

电子信息与电气学科规划教材

光纤通信系统与网络 (修订版)

胡 庆 张德民 胡 敏 王敏琦 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统阐述了现代光纤通信系统与网络所包含的主要相关部分的基本构成、基本原理、基本概念、基本理论、基本性能指标及特性特点。包括当前广泛应用的典型光纤通信系统的原理、光纤传输原理及传输特性、基本光纤通信器件原理及性能指标、光纤通信系统及设备、SDH 光同步数字传输网络、基于 SDH 的多业务传送平台 MSTP、DWDM/WDM 光传输网络、光纤接入网、EPON 系统结构及原理、高速光纤计算机网及全光通信网等内容。并且特别注重以形象直观的图表形式来配合文字叙述。

全书注重理论与实践、设计与工程的结合,精选了一些当前最新的应用实例进行分析,有助于读者学习。为了配合教学和学习,每章都精选一定数量的习题。可供科研、教学和工程技术人员参考,也可作为各高等院校工科通信与信息工程类专业课教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信系统与网络 / 胡庆等编著. —修订本. —北京: 电子工业出版社, 2010. 8

电子信息与电气学科规划教材

ISBN 978-7-121-11578-3

I. ①光… II. 胡… III. ①光导纤维通信系统—高等学校—教材 ② 光纤通信—通信网—高等学校—教材
IV. ①N929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 157578 号

责任编辑: 竺南直 特约编辑: 郭 莉

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 15.5 字数: 396 千字

印 次: 2010 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 25.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

修订版前言

信息传输是信息社会的三大标志之一,“光纤传输技术”的发展,决定着“整个通信网络”的发展。在当今提出“三网融合”的信息高速网路发展中,光纤通信系统与网络又一次进入了现代光纤传输网络的建设高潮。为了适应光纤通信技术发展的快速性,知识更新强烈的需求性,作者融合了近十年的教学经验、多年的工程实践以及光纤通信发展多样化而重新修订本教材。在教材修订编写过程中,主编人员一直注重教学与科研相长,将科研成果融入教材中,确保教材的前沿性、科学性和系统性。本次重点增加了反映当前新技术的光纤 PMD 特性以及 PMD 影响高速光纤系统传输中继段长计算, DWDM 中继段长计算,基于 SDH 的多业务传送平台 MSTP 原理与应用,光纤接入网中 APON, GPON, EPON 接入技术,全光通信网相关内容等。力求给读者一个比较全面、系统从理论到实际的光纤通信系统与网络的完整框架。

本书比较全面、系统地讲述了现代光纤通信系统的基本原理、基本技术、系统设计和光纤通信网络。全书共 9 章:第 1 章介绍光纤通信系统与网络的组成、特点、发展简史、现状和发展趋势;第 2 章介绍光纤传输原理及传输特性,包括光纤的结构、类型、导光原理、传输特性及非线性效应;第 3 章介绍光纤通信的基本器件,包括光有源器件和光无源器件原理、特性和参数;第 4 章介绍光纤通信系统及设计方法,内容包括光发射机、光接收机以及光中继器的组成,PDH 和 SDH 系统指标分配和系统设计等;第 5 章介绍 SDH 光同步数字传输网络;第 6 章讨论 DWDM/WDM 光传输网络;第 7 与第 8 章分别介绍光纤接入网及 APON, GPON, EPON 接入技术和高速光纤计算机网;第 9 章介绍全光通信网,包括全光通信网的结构、光交换技术、自动交换光网络(ASON)等。

本书前 8 章由胡庆编写,第 7 章张德民修订,第 8 章由胡敏修订、第 9 章由王敏琦、胡庆编写。全书由胡庆统稿,由张德民审核。在全书编写期间得到了严常青、张毅、杨晓波、刘鸿、李季碧、夏仙等同志的大力协助,在此一并表示感谢。

为适应当前高校课程门类多、课时压缩的教学特点,本书在概念和原理的讲述上力求严谨、准确、精练,理论适中,注重实用,主要面向工科院校,尽量少用繁杂的数学推导。

本书可作为高等学校通信工程、电子信息工程、信息工程、电子信息科学与技术以及其他电子信息类专业本科生教材,也可供研究生、科技工作者和工程技术人员参考。

由于编著者水平有限,书中难免存在疏漏和错误,恳请读者批评指正。

编著者
2010 年 7 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 光纤通信的发展简况	1
1.1.1 光纤通信的特点	1
1.1.2 光纤通信的发展简史	3
1.2 光纤通信系统及发展现状	5
1.2.1 光纤通信系统模型	5
1.2.2 光纤通信系统的现状	5
1.3 光纤通信网络及现状	7
1.3.1 通信网概念	7
1.3.2 光纤通信网络模型	8
1.3.3 光纤通信网络现状	8
1.4 光纤通信发展趋势	11
1.4.1 光纤、光缆发展趋势	11
1.4.2 光纤通信系统发展趋势	11
1.4.3 光纤通信网络发展趋势	12
习题	13
第 2 章 光纤传输原理及传输特性	14
2.1 光纤和光缆的结构及类型	14
2.1.1 光纤结构及类型	14
2.1.2 光缆结构及类型	18
2.1.3 光缆型号、规格及特性	19
2.2 光纤传输原理分析	22
2.2.1 射线理论分析光纤的传输原理	22
2.2.2 波动理论分析光纤的传输原理	26
2.3 光纤的结构参数	33
2.3.1 几何参数	33
2.3.2 折射率分布和数值孔径	33
2.3.3 模场直径	34
2.3.4 截止波长	34
2.4 光纤的传输特性	35
2.4.1 损耗特性	35
2.4.2 色散特性和带宽	38
2.4.3 光纤双折射及偏振特性	42
2.4.4 光纤的非线性效应	44

习题	47
第 3 章 光纤通信基本器件	48
3.1 光源器件	48
3.1.1 半导体激光器的结构及原理	48
3.1.2 分布反馈式和可调谐式半导体激光器	55
3.1.3 半导体激光器的主要特性	58
3.1.4 半导体发光二极管 (LED)	61
3.1.5 半导体发光二极管的主要特性	62
3.2 光检测器件	63
3.2.1 PD 光电二极管	63
3.2.2 PIN 光电二极管	64
3.2.3 APD 雪崩光电二极管	65
3.2.4 光电二极管的主要特性	66
3.3 光纤放大器 (EDFA)	69
3.3.1 EDFA 的结构及原理	70
3.3.2 EDFA 的主要特性	71
3.4 光纤连接器件	74
3.4.1 光纤连接器的结构与种类	74
3.4.2 光纤连接器的主要性能指标	75
3.4.3 影响光纤连接损耗的因素	76
3.5 光分路耦合器和波分复用器	77
3.5.1 光分路耦合器	77
3.5.2 波分复用器和解复用器	79
3.6 光隔离器与光环行器	84
3.6.1 光隔离器	84
3.6.2 光环行器	85
3.7 光衰减器和光开关	86
3.7.1 光衰减器	86
3.7.2 光开关	86
3.8 偏振控制器和光调制器	88
3.8.1 偏振控制器	88
3.8.2 光调制器	89
习题	90
第 4 章 光纤通信系统及设计	91
4.1 两种数字传输体制	91
4.1.1 准同步数字体系 PDH	91
4.1.2 同步数字体系 SDH	92
4.2 光发射机	93

4.2.1	光源直接强度调制	93
4.2.2	光发射机的构成及原理	94
4.2.3	光发射机的主要性能指标	101
4.3	光接收机	102
4.3.1	光接收机的结构及原理	102
4.3.2	光接收机的噪声分析	105
4.3.3	光接收机的主要性能指标	107
4.4	光中继器	109
4.5	系统的性能指标	110
4.5.1	系统的参考模型	110
4.5.2	系统的性能指标	111
4.6	光纤通信系统的设计	117
4.6.1	系统的总体考虑	117
4.6.2	系统传输中继段长的估算	118
	习题	122
第 5 章	SDH 光同步数字传输网络	124
5.1	SDH 传输体制的基本概念	124
5.1.1	基本概念与帧结构	124
5.1.2	SDH 的段开销字节	126
5.1.3	SDH 的复用映射结构	127
5.2	SDH 的基本网络单元设备	129
5.2.1	终端复用器 TM 和分插复用器 ADM	130
5.2.2	再生中继器 (REG)	131
5.2.3	数字交叉连接设备 (DXC)	131
5.3	SDH 网络结构与保护	131
5.3.1	传送网的分层与分割	131
5.3.2	SDH 网络结构	134
5.3.3	SDH 网同步的概念	136
5.3.4	SDH 自愈环网原理	138
5.3.5	SDH 网络管理	141
5.4	基于 SDH 的多业务传送平台 MSTP	142
5.4.1	MSTP 的功能块模型及优势	143
5.4.2	MSTP 技术应用	145
	习题	146
第 6 章	DWDM/WDM 光传输网络	148
6.1	DWDM 系统构成模型	148
6.1.1	波分复用基本概念	148
6.1.2	DWDM 在传输网中的定位	149

6.1.3 DWDM 系统构成模型	150
6.1.4 实用 DWDM 系统的构成	151
6.1.5 DWDM 系统的主要器件	153
6.2 DWDM 基本网络单元设备	156
6.2.1 光终端复用设备 (OTM)	156
6.2.2 光线路放大设备 (OLA)	161
6.2.3 光分插复用设备 (OADM)	162
6.2.4 光交叉连接设备 (OXC)	163
6.3 DWDM 网络结构与保护	164
6.3.1 光传送网的分层	164
6.3.2 DWDM 网络结构	166
6.3.3 DWDM 自愈环网原理	167
6.3.4 DWDM 网络管理	170
6.4 DWDM 光网络在长途干线的应用	172
习题	173
第 7 章 光纤接入网	175
7.1 光纤接入网的基本概念	175
7.1.1 接入网的界定与分层	175
7.1.2 光纤接入网基本网元设备	179
7.1.3 光纤接入网的拓扑结构	184
7.2 无源光网络 (PON) 接入网	185
7.2.1 PON 的种类	185
7.2.2 APON, GPON, EPON 接入技术比较	187
7.3 EPON 系统结构及原理	188
7.3.1 EPON 系统结构	188
7.3.2 EPON 系统的工作原理	189
7.3.3 EPON 帧结构	190
7.3.4 EPON 关键技术	191
7.3.5 EPON 基本网络单元设备	193
7.4 光纤接入网的应用	195
7.4.1 PON 接入网应用	195
7.4.2 TDD+TDM+TDMA 的 PON 的 OAN	196
7.4.3 混合拓扑结构的 HONET 接入网	197
习题	199
第 8 章 高速光纤计算机网	200
8.1 光纤局域网概述	200
8.1.1 光纤局域网特点	201
8.1.2 光纤局域网拓扑结构与协议体系结构	201

8.1.3 光纤局域网的组成及基本设备功能	203
8.2 光纤分布式数据接口 (FDDI) 环网	208
8.2.1 FDDI 的技术特点及网络结构	208
8.2.2 FDDI 双环自愈网	209
8.2.3 FDDI 技术在校园主干网的应用	210
8.3 高速光纤以太网	211
8.3.1 100 Mb/s 光纤以太网	211
8.3.2 1 000 Mb/s 光纤以太网	211
8.3.3 10 Gb/s 光纤以太网	212
8.4 光互联网简介	212
8.4.1 光互联网的概念	212
8.4.2 光互联网的体系结构	215
习题	215
第 9 章 全光通信网	216
9.1 全光通信网概述	216
9.1.1 全光通信网的基本概念	216
9.1.2 全光通信网的结构	217
9.1.3 全光通信网的特点	218
9.1.4 全光通信网的相关技术	218
9.2 光交换技术	220
9.2.1 光的电路交换技术	220
9.2.2 光的分组交换技术	223
9.2.3 光突发交换技术	224
9.2.4 光标记交换技术	226
9.3 自动交换光网络 (ASON)	226
9.3.1 ASON 的体系结构及主要功能	227
9.3.2 ASON 的主要特点	229
9.3.3 ASON 提供的 3 种连接	229
9.3.4 ASON 的网络结构模型	230
9.3.5 ASON 的标准化	231
9.3.6 ASON 的应用	232
习题	234
参考文献	235

第 1 章 概 论

从诞生光纤通信以来，一场持续的革命一直改变着世界的通信。人们所需的清晰、可靠、远距离、大容量通信能力，逐步变成了现实。这场革命的核心是用传输光信息的光缆来代替铜线电缆。今天的光纤通信已渗透到各种电信网络、数据网络、有线电视（CATV）网络和光互连网络等信息网络中，可以说，目前光纤通信已成为信息传输最重要的方式之一。现如今，只有对光纤通信系统与网络的传输性能和通信原理有足够的理解才能以较少的投入而获得高质量的通信。信息的高速传输使人们“决策帷幄中，致胜千里外”已不再是幻想。

1.1 光纤通信的发展简况

1.1.1 光纤通信的特点

光纤通信是以相干性和方向性极好的激光束作为载体来携带信息，并利用光纤来进行传输的通信方式。由于光纤的传光性能优异，传输带宽极大，现在已形成了以光纤通信为主，微波、卫星和电缆通信为辅的信息传输网络格局。

通信发展始终在追求两大目标，一是远距离传输，二是大容量通信。人们知道无论是无线电通信，还是有线电通信都是以电磁波为载体进行的，而电磁波的频谱很宽，其分布情况如图 1-1 所示。由图可见，无线电通信所用波段在波长为几厘米至几千米范围内。由通信理论可知，通信容量与电磁波频率成正比例增大，所以人们一直在探索将更高频率的电磁波用于通信技术。光纤通信中所用的光载波实质是人们所熟悉的、与无线电波相似的电磁波，其波长在 μm 级，频率非常高，约为 10^{14} Hz 量级。其频率比传统的电通信容量最高的“微波”段高 $10^4 \sim 10^5$ 倍。目前光纤通信使用波长范围为 $0.85 \sim 2.00 \mu\text{m}$ ，采用的典型中心波长为 $0.85 \mu\text{m}$ ， $1.31 \mu\text{m}$ ， $1.55 \mu\text{m}$ 和 $1.625 \mu\text{m}$ 。

光纤通信与电缆或微波等通信方式相比，主要区别有二，一是用很高频率的光波作载波；二是用光纤作为传输介质。光纤具有传输容量大、传输损耗小、重量轻、不怕电磁干扰等一系列优点。基于此，光纤通信有以下明显的特点。

(1) 由于光波频率高，可供利用的频带极宽，尤其适合高速宽带信息的传输，在高速通信干线、宽带综合业务通信网络中，发挥着越来越大的作用。

(2) 由于光纤的传输损耗很低，现已做到 0.2 dB/km 以下，因而可以大大增加通信无中继距离，这对于长途干线和海底传输十分有利。在采用了先进的相干光通信，光放大器和光孤子通信技术之后，无中继通信距离可提高到几百公里，甚至上千公里。

(3) 光纤传输是限制在光纤内的，光能几乎不会向外辐射，因此不存在光缆中各光纤

之间信号串扰，很难被窃听，信号传输质量高，保密性好。

（4）光纤抗电磁干扰能力很强，这对于电气铁路和高压电力线附近的通信极为有利，也不怕雷击和其他工业设备的电磁干扰，因此在一些要求防爆的场合使用光纤通信是十分安全的。

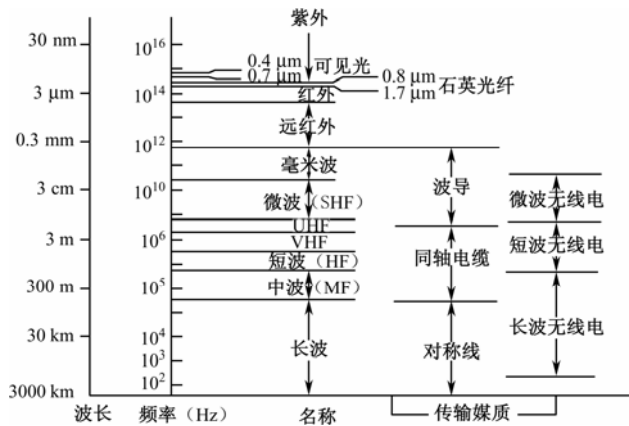


图 1-1 电磁波谱

（5）光纤几何尺寸小，细如发丝，可绕性好，可多根成缆，便于敷设。光纤重量轻，特别适用于飞机、轮船、卫星和宇宙飞船。

（6）光纤的化学性能稳定，耐化学侵蚀、抗高温、不打火花，适用于特殊环境。

（7）光纤是石英玻璃拉制成形的，原料资源丰富，节约有色金属。

同时光纤通信也存在以下缺点：

（1）光纤弯曲半径不宜过小，否则可能引起较大的衰减。

（2）光纤的连接操作技术要求高，需专用设备。

（3）光纤的分路、耦合操作较困难、烦琐。

应该指出，光纤通信的上述缺点，现已在一定程度上得到克服，它们不影响光纤通信的实用。表 1.1 和表 1.2 分别列出了光纤与几种电通信传输介质的特性比较及光纤通信应用场所。

表 1.1 光纤与几种电通信传输介质的特性比较

传 输 介 质	带 宽	衰减系数/(dB/km)	中继距离/(km)	敷 设 安 装	接 续
对称电缆	6 MHz	20 (注 1)	1~2	方便	方便
同轴电缆	400 MHz	19 (注 2)	1.6	方便	较方便
微波波导	40~120 MHz	2	10	特殊	特殊
光纤光缆	$\geq 10 \text{ GHz} \cdot \text{km}$	0.2~3	> 50	方便	特殊

注 1：当传输信号频率为 4 MHz 时的值。

注 2：当传输信号频率为 60 MHz 时的值。

表 1.2 光纤的特点及其应用场合

光 纤 特 点	应 用 场 合
低衰减、宽频带 尺寸小、重量轻 抗电磁干扰 耐化学侵蚀	公用通信、计算机通信、有线电视图像传输 飞机、导弹、航空航天、舰艇内的通信控制 电力及铁道通信，交通控制信号，核电站通信 油田、炼油厂、矿井等区域的通信

1.1.2 光纤通信的发展简史

众所周知，光早已用于远距离通信，如烽火台、信号灯等，但早期所用光通信方法是原始的、落后的和不太可靠的。现代光通信概念是 1880 年提出的，A.G 贝尔研究出一个可以在可见光束上，两百米距离内传送话音的光电话机装置，其原理是用振动的话音声波调制阳光，将已调光波通过镜面反射入大气传输至终端，终端接收机将连续话音光信号通过光电池还原，这个想法是真正意义上的光通信。但遗憾的是此技术不能实用。究其原因有二：一是没有可靠的、高强度的光源；二是没有稳定的、低损耗的传输媒质，所以无法得到高质量的光通信。光纤通信及其技术是近几十年迅猛发展起来的高新技术，它的诞生和发展，给通信技术带来了划时代的革命。

1960 年，梅曼（T.H.Maiman）发明了第一台相干振荡光源——红宝石激光器。激光器（Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, Laser）是基于物质原子、分子内能的变化而构成的光波振荡器。它可产生频谱纯度很高的激光。但气体和固体激光器体积大、效率低，不适宜在通信中使用。

1962 年半导体激光器出现，为光通信光源实用化带来了希望。1970 年，首次研制出在室温下连续工作的双异质结半导体激光器，为实用化通信光源奠定了基础。

1966 年，华裔科学家高锟（C.K.Kao）根据介质波导理论提出光纤作为光通信传输媒质的概念，由此高锟教授荣获 2009 年诺贝尔物理学奖。

1970 年，美国康宁公司的 Maurer 等人首次研制出阶跃折射率多模光纤，其在波长为 630 nm 处的衰减系数小于 20 dB/km；同年美国贝尔实验室的 Hayashi 等人研制出室温下连续工作的 GaALAs 双异质结注入式激光器。正是光纤和激光器这两个科研成果的同时问世，拉开了光纤通信的序幕。到 70 年代末，在 1310 nm 波长上，光纤衰减系数已降至 4 dB/km；在 1550 nm 波长上，降至 0.20 dB/km，已接近理论值。与此同时，为促进光纤通信系统的实用化，人们又及时地开发出适用于长波长的光源（激光器、发光管）和光检测器。应运而生的光纤成缆、光无源器件和性能测试及工程应用仪表等技术的日趋成熟，都为光纤通信作为新的通信方式奠定了坚实的基础。

1976 年，美国西屋电气公司在亚特兰大成功地进行了世界上第一个传输距离为 110 km 的 44.736 Mb/s 光纤通信系统的现场实验，使光纤通信向实用化迈出了第一步。

我国自 70 年代初就已开始了光纤通信技术的研究，1977 年，武汉邮电科学研究院研制成功中国第一根阶跃折射率分布的、波长为 0.85 μm 的的衰减系数为 3 dB/km 多模光纤。后来又研制成功单模光纤、特殊光纤以及光通信设备。

1987 年底，建成第一个国产的长途光通信系统，由武汉至荆州，全长约 250 km，传输

34 Mb/s 信号，光缆采用架空方式。

1988 年起，国内光纤通信系统的应用由多模光纤转为单模光纤。

1993 年，我国与日本、美国三方投资建设的第一条大容量海底光缆正式开通，全长 1250 km，传输速率 560 Mb/s，可提供 7560 条电路，相当于原有的中日海底同轴电缆的 15 倍。

1999 年我国完成了“八纵八横”通信光缆工程，全长约 80000 km，如图 1-2 所示。它作为整个国家南北东西的主干通信网，使我国光纤通信水平迈上了新台阶。

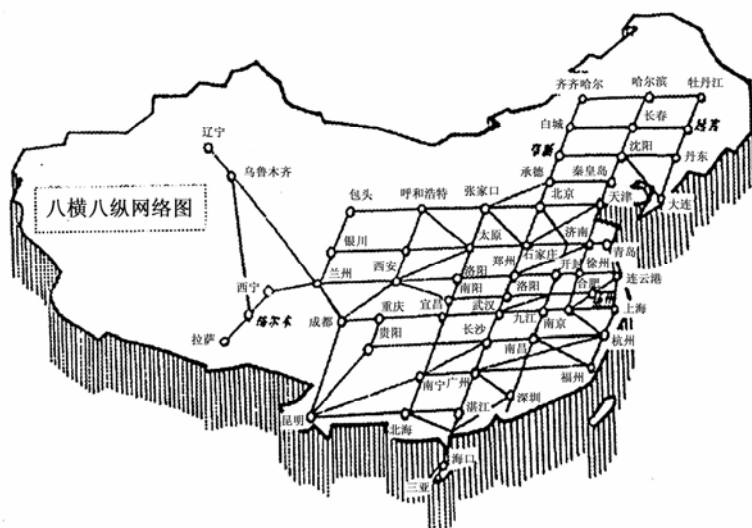


图 1-2 八横八纵光纤网络图

近年，着力解决全网瓶颈——将光纤接入网作为通信接入网的一部分，直接面向用户。提出“光进铜退”策略，即将光纤引入到千家万户，保证亿万用户的多媒体信息畅通无阻地进入信息高速公路。在网络传输的高速化方面，目前商用系统的速率已从 155.520 Mb/s 增加到 10 Gb/s，不少已达到 40 Gb/s，另外，速率达 160 Gb/s 和 640 Gb/s 的传输试验也获得成功。

光纤通信技术的问世与发展给世界通信业带来了一场变革。特别是 40 年间，光纤通信的研究和开发非常迅速：技术上不断更新换代，通信能力（传输速率和中继距离）不断提高，应用范围不断扩大。到目前为止光纤通信的发展可以粗略地分为四个阶段：

第一阶段（1966~1976 年），从基础研究到商业应用的开发时期。在这个时期，实现了短波长（0.85 μm ）低速率（34 Mb/s 或 45 Mb/s）多模光纤通信系统，无中继传输距离约 10 km。

第二阶段（1976~1986 年），以提高传输速率和增加传输距离为研究目标，大力推广应用的大发展时期。在这个时期，实现了工作波长为 1.31 μm 、传输速率为 140~565 Mb/s 的单模光纤通信系统，无中继传输距离为 50~100 km。

第三阶段（1986~1996 年），以超大容量和超长距离为目标、全面深入开展新技术研究的时期。在这个时期，实现了 1.55 μm 色散移位单模光纤通信系统。采用外调制技术，传输速率可达 2.5~10 Gb/s，无中继传输距离可达 100~150 km。

第四阶段（1996~2006 年），主要研究光纤通信新技术，例如，超大容量的密集波分复用技术使最高速率达到 $256 \times 40 \text{ Gb/s} = 10 \text{ Tb/s}$ 和超长距离的光孤子通信技术等。

目前人们正涉足第五阶段光纤通信系统的研究和开发，其至少具有四大特征：超宽带——单根光纤传输容量 Tb/s 以上；超长距离——光放大距离可达数千 km ；光交换——克服电交换瓶颈；智能化——智能光网络技术。

1.2 光纤通信系统及发展现状

1.2.1 光纤通信系统模型

光纤通信系统可以传输数字信号也可以传输模拟信号，传输的可以是话音、图像、数据和多媒体业务等各类信息。目前实用的光纤通信系统，采用的是强度调制（IM）—直接检测（DD）的实现方式，由光发送设备、光纤传输线路、光接收设备和各种耦合器件等构成，其示意图如图 1-3 所示，现主要用于骨干（长途）网、本地网以及光纤接入网。

图 1-3 中所示的是一个方向的传输系统，反方向传输系统的结构与之相同。光纤通信系统中电发射机的作用是对来自信源的信号进行模/数转换和多路复用处理；光发射机（如激光器 LD 或发光二极管 LED）的作用是实现电/光转换，即把电信号调制成光信号，送入光纤传输至远方；光接收机（如光电二极管 PIN 或 APD）的作用是实现光/电转换，即把来自光纤的光信号还原成电信号，经放大、整形、再生恢复原形后，送至电接收机，完成数字信号的分接以及数/模转换，送至信宿。

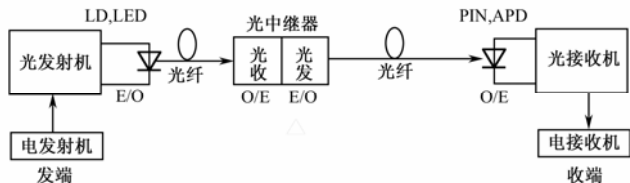


图 1-3 光纤通信系统示意图

对于长距离的光纤传输系统，中途还需要中继器，其作用是将经过光纤长距离衰减和畸变后的微弱光信号放大、整形、再生成具有一定强度的光信号，继续送向前方，以保证良好的通信质量。目前的中继器都采用光—电—光形式，即将接收到的光信号，用光电检测器变换为电信号，经放大、整形、再生后再调制光源，将电信号变换成光信号重新发出。近年来，适合作光中继器的光放大器（如掺铒光纤放大器）已进入商用。也就是说，采用光放大器的全光中继及全光网络将为期不远了。

1.2.2 光纤通信系统的现状

1. 模拟光纤通信系统的现状

传输模拟信号的光纤通信系统称为模拟光纤通信系统，模拟光纤通信系统多应用于工

业控制和 CATV 网络，如用于工业监控的单路电视系统和用于 CATV 的多路光纤传输系统。多路光纤传输系统常用频分复用技术实现，目前已先后开发了 16 路、32 路、48 路、64 路和 128 路的光纤 CATV 传输系统，应用在光纤彩色闭路电视和广播电视传送方面。光纤 CATV 传输系统一般由信号源、前端、干线传输和用户分配网络几个部分组成，如图 1-4 所示。由于线性度好、调制带宽很宽的半导体激光器和高频线性补偿电路的研制成功，使光纤 CATV 传输系统得到了广泛应用。

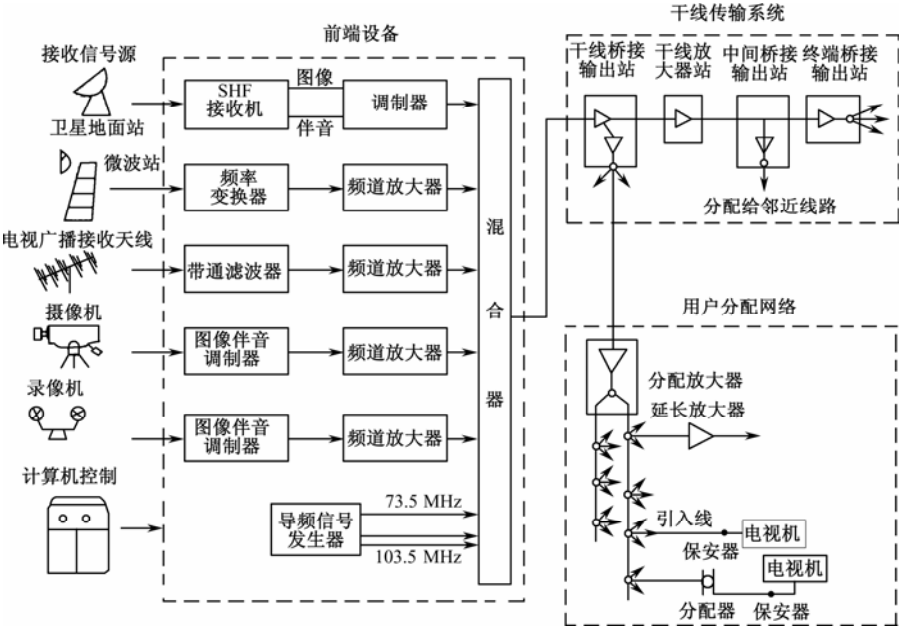


图 1-4 CATV 传输系统基本组成

2. 数字光纤通信系统的现状

传输数字信号的光纤通信系统称为数字光纤通信系统，数字光纤通信系统有 PDH 和 SDH 两种传输体制。我国采用的 PDH 传输体制的速率分四级，即基群速率为 2.048 Mb/s，2 次群速率为 8.448 Mb/s，3 次群速率为 34.368 Mb/s，4 次群速率为 139.264 Mb/s。SDH 传输体制的速率，是按同步传输模块 STM-N 系列来分的，即 STM-N (N=1, 4, 16, 64) 速率为 $155.520 \times N$ Mb/s，亦即 STM-1 速率是 155.520 Mb/s，STM-4 速率是 622.080 Mb/s。根据所需传输容量选择同步数字传输系列等级，一般大中城市市内中继光纤通信系统选用 STM-64；小城市（镇）和乡村中继光纤通信系统既可选用 STM-4 或 STM-16，也可选 PDH 传输体制的 2 次群或 3 次群；长途干线光纤通信系统常用掺铒光纤放大器 EDFA 为光中继器，单一光波长的数字光纤通信系统，如图 1-5 所示。采用多波长复用的数字光纤通信系统称为密集波分复用（DWDM）系统。光波分复用是在一根光纤上传输多个光信道的光纤通信方式，充分利用了光纤带宽，有效扩展了通信容量，图 1-6 给出了一个 32 波分复用系统，即 $32 \times \text{STM-64}$ 组成的光纤通信系统。

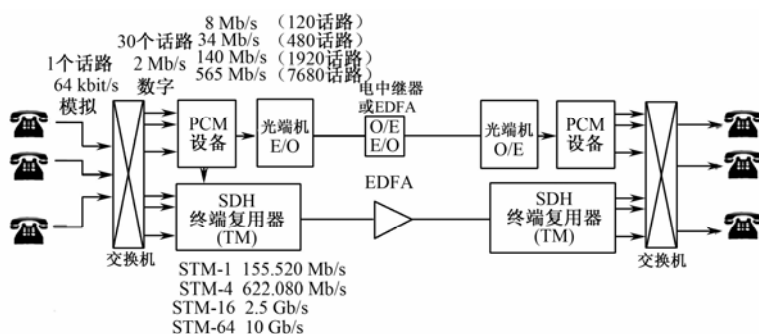


图 1-5 数字光纤通信系统原理图

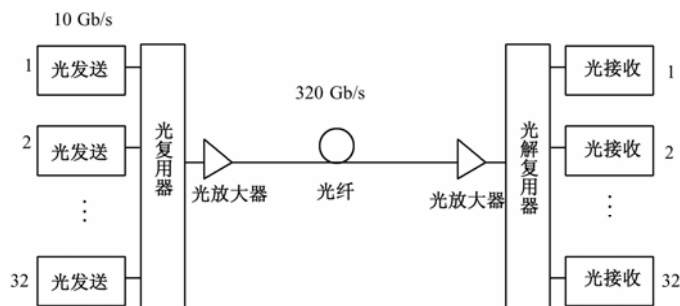


图 1-6 32xSTM-64 DWDM 光纤通信系统原理图

1.3 光纤通信网络及现状

1.3.1 通信网概念

两用户间需要通信时，利用通信系统来完成，也就是说，欲让 A、B 两地的用户互相通信，必须在他们之间建立一个通信系统。对于离散分布的 n 个用户，若要让其中任意两用户能互相通信，最简单的方法是用传输线把各用户分别一一连接起来，这就需要建立 $n(n-1)/2$ 个通信系统。此时，若自高空向地面俯视，可以看到有很多传输设备与传输线路纵横交错地分布在大地上，犹如罩着一个鱼网，故称为“通信网”。一个完整的通信网由用户终端设备、传输设备、交换设备和相应的信令、协议、标准等软件构成。通信网的基本拓扑结构图如图 1-7 所示，图中圆点代表网络节点，节点既可以是终端节点，如电话机、传真机、电视机、计算机等，也可以是网络节点，如交换机、传输设备、路由器和中继器等。节点之间由传输线连接在一起。

通信网的基本结构主要有网状、星状、复合型、环状和总线型等（见图 1-7）。将各类网型结合起来，网络的结构就会合理得多。网状网是完全互联网结构，需要传输系统多，利用率较低，但接续质量和网络稳定性好；具有 N 个节点的星状网共需 $(N-1)$ 条传输系统，

显然， N 值较大时会节省大量的传输系统；复合型网兼备了网状网和星状网的优点；环状和总线型这两种网络在计算机通信中应用较多。

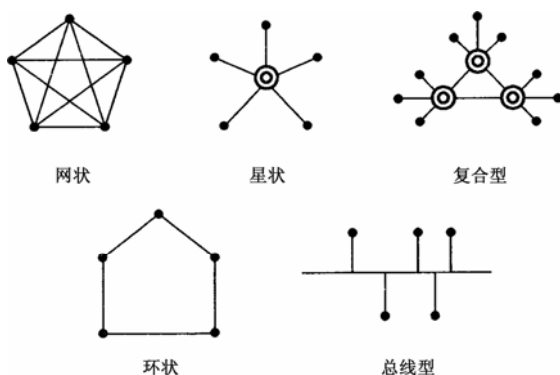


图 1-7 通信网的基本拓扑结构图

1.3.2 光纤通信网络模型

光纤通信网根据电信的业务来分，有电话网、电报网、传真通信网、计算机数据网、图像通信网及有线电视网等；按服务区域范围分为：长途骨干网、本地网以及用户接入网。

一个完整光纤通信网络实质上是由用户终端设备、传输设备、交换设备和相应的信令、协议、标准、资费制度与质量标准等软件构成。

用户终端设备是以用户线为传输信道的终端设施，也称为终端节点。

传输设备是为用户终端和业务网提供传输服务的电信终端，主要包括数字复用、解复用设备和光收、发信机设备。

交换设备用于完成用户群内的各个用户终端之间通信线路的汇聚、转接和交换，并控制信号的流向。交换设备的种类有：源于电话通信的程控电话交换机、源于数据通信的分组交换机、源于宽带通信的 ATM 交换机、软交换机及全光通信中即将问世的光交换机等。

信令系统是通信网的神经系统。比如，电话要接通，必须传递和交换必要的信令，完成各种呼叫处理、接续、控制与维护管理等功能。信令系统可使网络作为一个整体而正常运行，有效完成任何用户之间的通信。

协议是通信网中用户与用户、用户与网络资源、用户与交换中心间完成通信或服务所必须遵循的规则和约定的共同“语言”。这种语言能使通信网正确控制、合理运行。

标准是由权威机构建议的协议，是通信网应遵守的条款。

1.3.3 光纤通信网络现状

光纤通信网络不仅适用于电信业务网，而且也广泛适用于有线电视网、计算机局域网、光互联网等信息网络。

1. 光纤通信在长途骨干网、本地网中的应用

骨干网、本地网中继传输主要以光纤传输（通信）系统为主，其结构如图 1-3 所示。

2. 光纤通信在用户接入网中的应用

光纤接入网是指在用户接入网中采用光纤作为主要传输媒质来实现用户信息传送的应用形式。光纤接入网的主要优点是可以传输宽带业务，如高速数据下载业务、IPTV 业务和图像传送业务等，且传输质量好、可靠性高。网径一般较小，可不需要中继器等。图 1-8 给出了一种光纤接入网示意图，它将光纤引入千家万户保证多媒体信息畅通无阻。

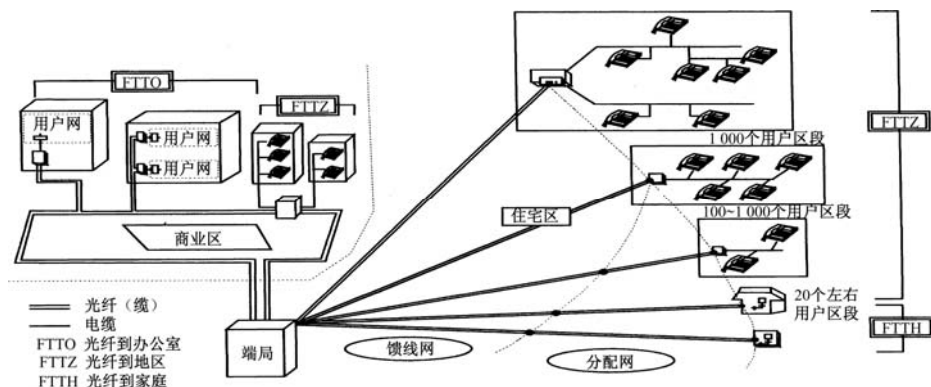


图 1-8 光纤接入网示例

3. 光纤通信在电视、数据传输网中的应用

利用光纤作为有线电视（CATV）的干线传输媒质，可大大提高信号传输质量，为多功能、大容量的信息传送提供了基础。然而，目前做到光纤到户成本很高，难于大规模实现。因此，目前 CATV 网的最佳选择是光纤、同轴电缆混合（HFC）传输方式。基于光纤通信网络容易建成高速率计算机网，如可将计算机局域网连在如图 1-9 所示的分前端，借助光纤通信网络实现高速数据传输网络。

4. 光纤通信在计算机校园网中的应用

利用光纤通信系统可容易地传输 1000 Mb/s 计算机校园网的数据信号，其结构可如图 1-10 所示。

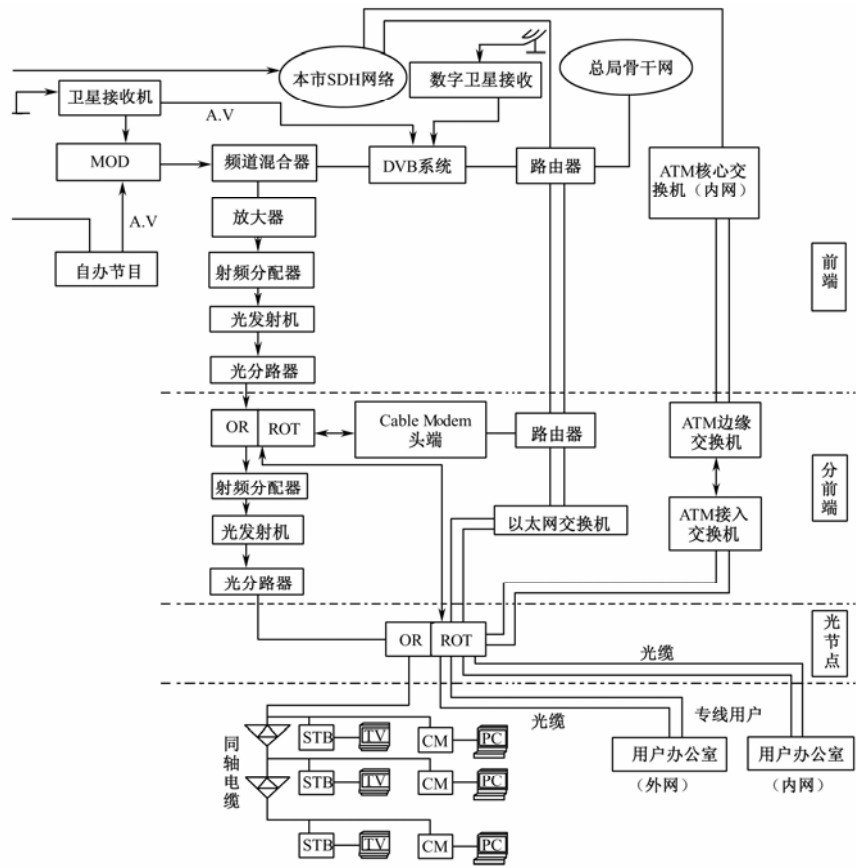


图 1-9 电视、数据传输网络结构图

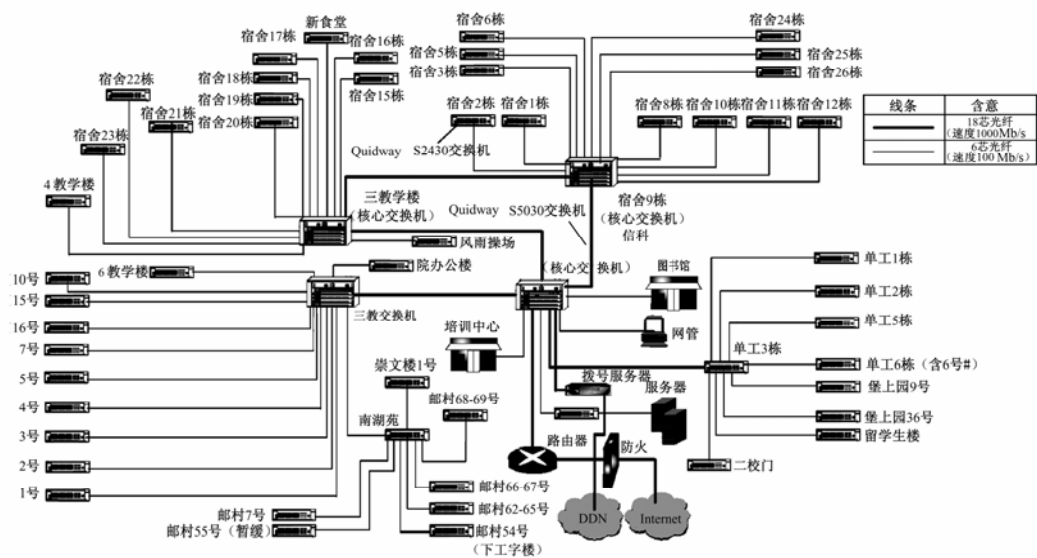


图 1-10 计算机校园网组成

1.4 光纤通信发展趋势

光纤通信技术的问世与发展给世界通信业带来了革命性的变革。特别是经历近 40 年的研究开发, 光纤、光缆、器件、系统的品种不断更新, 性能逐渐完善, 已使光纤通信成为信息高速公路的传输平台。当今光纤通信技术的发展趋势主要有如下几点。

1.4.1 光纤、光缆发展趋势

由于光纤传输速率的逐步高速化、大容量化(如美国 MCI 于 1991 年开通了 Chicago 至 St.Louis 全长 442.57 km 的 4×10 Gb/s 的商用系统等), 光纤衰减、色散、非线性效应等现象严重影响到光纤通信系统的质量, 因而, 人们已将光纤的工作波长由 850 nm 向 1310 nm~1550 nm 的长波长移动, 进而向 2000 nm 波长区域扩展。

为降低衰减、色散和非线性效应, 相继研制出了应用广泛的常规单模光纤 (ITU—T G.652), 其在 1310 nm 为零色散, 在 1550 nm 为最低损耗, 工作波长为 1310 nm; 色散位移单模光纤 (ITU—T G.653), 其低损耗和零色散均在 1550 nm, 工作波长为 1550 nm; 截止波长位移单模光纤 (ITU—T G.654), 其在 1550 nm 衰减仅为 0.15 dB/km; 非色散位移单模光纤 (ITU—TG.655), 其在 1550 nm 损耗小, 色散小, 非线性效应小; 宽带光传送的非零色散光纤 (ITU—TG.656); 用于接入网弯曲衰减不敏感的单模光纤 (ITU—TG.657)。

随着光纤通信容量不断增大、中继距离不断增长的需求, 保偏光纤是重要研究方向。采用相干光纤通信系统, 可实现越洋无中继通信, 但要求保持光的偏振方向不变, 以保证相干探测效率, 因此常规单模光纤要向着保偏光纤方向发展。

市场需求是最好的发展源动力。用户对通信的要求也从窄带电话、传真、数据和图像业务逐渐转向可视电话、电视点播、图文检索和高速数据等宽带新业务, 由此而促生了光纤用户网。光纤用户网的主要传输媒介是光纤, 而用户光纤光缆的特点是含纤数量要高, 每缆可高达 2000~4000 芯, 因此高密度化的带状光缆诞生了, 它可减少光缆的直径和重量, 又可在工程施工中便于分支和提高接续速度。

1.4.2 光纤通信系统发展趋势

随着信息社会的到来, 信息共享、有线电视、电视点播、电视会议、家庭办公、计算机互联网等应运而生, 迫使光纤通信向高速化、大容量发展。实现高速化、大容量的主要手段是采用时分复用, 波分复用和频分复用。

现代电信网的发展对光纤通信提出更高的要求, 光纤通信已由以往单信道的光纤通信系统向多信道的波分复用系统发展。采用波分复用技术充分利用光纤的宽低损耗区, 在不改变现有光纤通信线路的基础上, 可以很容易地成倍提高光纤通信系统的容量。目前, 多波长复用 (DWDM) 加掺铒光纤放大器 (EDFA) 的高速光纤通信系统发展成为主流。实用的 DWDM 系统工作在 8~32 个波长, 每个波长可传输 2.5 Gb/s 或 10 Gb/s。

光纤通信系统向相干光纤通信系统方向发展，成为另一个趋势。目前，大多数光纤通信系统采用的是强度调制—直接检测方式，在相干光纤通信系统中采用相干检测方式，最大的好处是可提高光接收机的检测灵敏度，从而提高光纤通信系统的无中继传输距离。

1.4.3 光纤通信网络发展趋势

光纤通信从一开始就是为传送基于电路交换信息的，客户信号一般是 TDM 的连续码流，如 PDH 和 SDH 等。随着计算机网络，特别是互联网的发展，数据信息的传送量越来越大，客户信号中基于分组交换的具有随机性、突发性的分组信号码流的比例逐步增加。通过光纤通信 SDH 网络承载的数据信号的类型越来越多，如 FR, ATM, IP, 100BASE-FX, FE, GE, 10GE, DDN, FDDI, Fiber Channel, FICON 和 ESCON 等。

由此可见，随着网络化时代的到来，网络的不断演进和巨大的信息传输需求，对光纤通信提出了更高的要求，同时也促进了光纤通信技术的发展。就光纤通信网络技术而言，其发展方向有以下几点。

1. 信道容量不断增加

目前，实用化的单通道速率已由 155 Mb/s 到 32×10 Gb/s， 160×10 Gb/s 系统也已投入商用。在实验室，NEC 实现了 274×40 Gb/s 系统；阿尔卡特实现了 256×40 Gb/s 系统；西门子实现了 176×40 Gb/s 系统。

2. 超长距离传输

目前，实用化的距离传输已由 40 km 到 160 km。拉曼光纤放大器的出现，为进一步增大无中继距离创造了条件。在实验室，无电中继的传输距离已从 600 km 增加到 4 000 km。

3. 光传输与交换技术融合

实用化的点到点通信的 WDM 系统具有巨大的传输容量，但其灵活性和可靠性不够理想。采用光分插复用器（OADM）和光交叉连接设备（OXC）实现光联网，发展自动交换光网络 ASON。预计在未来 10 年内的超高速网络中，采用原来 DXC 设备的网络将走向采用 OXC 设备的光传送网。其关键技术是 DWDM 传输、光放大、光节点处理及多信道管理等。据报道， 256×256 全光交叉连接设备已研制出来。

4. 光纤接入网

随着对光通信的需求由骨干网逐步向城域网（本地网中的城区部分，特别是大城市）转移，光纤传输在逐渐靠近业务节点。对于数据业务的用户，希望光通信既能提供传输功能，又能提供多种业务接入功能，这就是目前已广泛使用的基于 SDH 的多业务传送平台（MSTP），同时实现 TDM, ATM, Ethernet 及 FR, FDDI, Fiber Channel, FICON 和 ESCON 等业务的接入处理和传送，提供统一网管的多业务的接入节点设备。基于 WDM 的多业务平台是将 WDM 的每个波道分别用作各个业务的通道，用透明传输的方式支持各种业务的接入处理，如在 FE, GE 等端口中嵌入 Ethernet2 层甚至 3 层交换功能等，使 WDM 系统不

仅仅具有传送能力，而且具有业务提供能力。

光接入网络的核心是全数字化、软件控制、高度集成和智能化。现有的接入网仍有部分是双绞铜线的模拟系统，已成为制约全网进一步发展的瓶颈。双绞线上的 xDSL 系统、同轴电缆上的 HFC 系统及宽带无线接入系统只是一些过渡性方案，唯一能够从根本上彻底解决这一瓶颈问题的技术手段是光纤接入网。

光纤接入网从广义上包括光数字环路载波系统（ODLC）和无源光网络（PON）两类。ODLC 不是新技术，是结合了开放的接口 V5.1/V5.2，在美国受到重视；PON 技术在德国和日本受到重视，它以 ATM 与 PON 结合形成 APON，或以 Ethernet 与 PON 结合形成 EPON，传输速率可达 155 Mb/s 或 622 Mb/s 甚至 1Gb/s，可以提供经济高效的语音、IP 数据、视频广播等多媒体传送平台，并有效地利用网络资源。

光纤接入网作为通信网的一部分，直接面向用户，通过把光纤引入千家万户，将使亿万用户的多媒体信息畅通无阻地进入信息高速公路。

习 题

1. 光纤通信的特点和应用。
2. 简述光纤通信系统组成及各部分功能。
3. 光纤通信与电通信方式的主要差异是什么？
4. 比较光纤通信各发展阶段的特点与差别。
5. 可通过哪些途径来提高光纤通信系统的传输容量。
6. 简述光纤通信的发展趋势。

第 2 章 光纤传输原理及传输特性

在光纤通信系统与网络中，光纤作为光波传输的良好介质得到了广泛的应用，光纤的传输特性对光纤通信的传输质量起决定作用。本章从应用角度介绍光纤光缆的结构、类型、传输原理与特性。

2.1 光纤和光缆的结构及类型

在光纤通信中，长距离传输光信号所需要的光波导是一种叫做光导纤维（简称光纤）的圆柱体介质波导。所谓“光纤”就是工作在光频下的多层次的一种介质波导，它引导光能沿着轴线平行方向传输。而光缆是由多根光纤和加强构件以及外护层构成。

2.1.1 光纤结构及类型

1. 光纤结构

光纤是由两种不同折射率的玻璃材料拉制而成，其基本结构如图 2-1 所示。内层为纤芯，是一个透明的圆柱形介质，其作用是以极小的能量损耗传输载有信息的光信号。紧靠纤芯的外面一层称为包层，从结构上看，它是一个空心的、并与纤芯同轴的圆柱形介质，其作用是保证光全反射只发生在纤芯内，使光信号封闭在纤芯中传输。通信用光纤的纤芯直径为 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ （单模光纤）或 $50\sim 80\text{ }\mu\text{m}$ （多模光纤），包层外直径均为 $125\text{ }\mu\text{m}$ 。为了实现光信号的传输，要求纤芯折射率比包层折射率稍大些，这是光纤结构的关键。包层材料通常为均匀材料，其折射率为常数 n_2 。纤芯的折射率可以是均匀的 n_1 ，也可以是沿纤芯半径 r 变化的 $n_1(r)$ 。另外还有一个涂覆层，其作用是为了进一步确保光纤不受外界机械作用和吸收诱发微变的剪切应力。图 2-1 中 a 是纤芯的半径， b 是包层的半径， r 是光纤径向坐标。

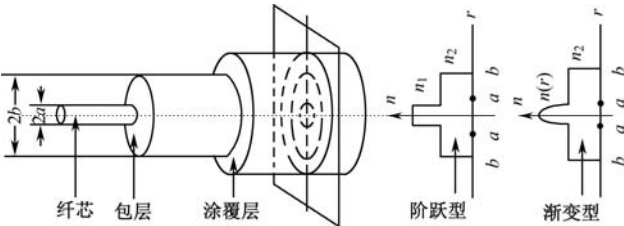


图 2-1 光纤结构

2. 光纤的分类

光纤分类可依据材料、波长、传输模式、纤芯折射率分布、制造方法的不同，将其分

为多种，如图 2-2 所示。

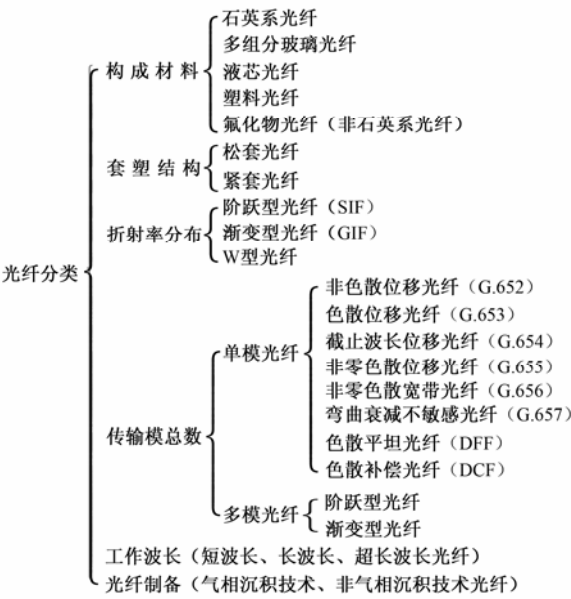


图 2-2 光纤的分类

由图 2-2 可知光纤分类的方法很多，这里只重点介绍按照传输模式的多少、按光纤横截面的折射率分布、按照国际电信联盟（ITU-T）对光纤标准的建议来分类。

按模式多少可分为多模光纤和单模光纤。

1) 多模光纤 (MultiMode Fiber, MMF)

在工作波长一定的情况下，光纤中存在有多个传输模式，这种光纤称为多模光纤。多模光纤的纤芯折射率分布有均匀和非均匀两种，前者为阶跃型多模光纤，后者为渐变型多模光纤。多模光纤的纤芯直径为 50~80 μm ，包层直径为 125 μm 。多模光纤的传输特性较差，带宽较窄，传输容量较小，目前使用相对较少。

2) 单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF)

在工作波长一定的情况下，光纤中只有一种传输模式，这种光纤就称为单模光纤。单模光纤只能传输基模 (LP_{01})，不存在模间的传输时延差，具有比多模光纤大得多的带宽，这对高速传输非常重要。单模光纤的带宽一般在几十 GHz 以上，纤芯直径很小 (约为 8~10 μm)，模场直径只有 9~10 μm ，包层直径仍为 125 μm 。

单模光纤又可分为常规单模光纤和特种单模光纤。特种单模光纤主要有双包层光纤、三角芯光纤、椭圆芯光纤等。它们的主要特点是：

(1) 双包层光纤在 1550 nm 为零色散，在 1310~1600 nm 色散平坦，如图 2-3 (a) 所示。

(2) 三角芯光纤在 1550 nm 有微量色散，有效面积较大，适合用于 WDM 系统，如图 2-3 (b) 所示。

(3) 椭圆芯光纤、熊猫光纤和蝴蝶光纤：具有高双折射特性，保偏状态，它们的截面结构图形如椭圆、熊猫和蝴蝶，故得名，分别如图 2-4 (a)、图 2-4 (b) 和图 2-4 (c) 所示。

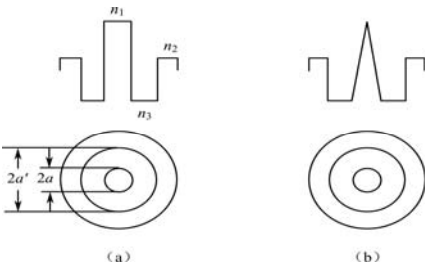


图 2-3 典型特种单模光纤

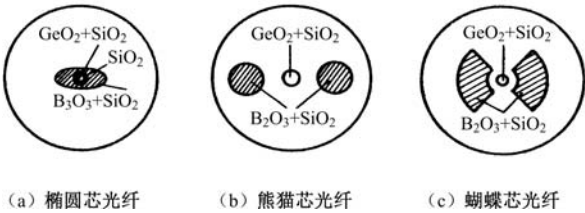


图 2-4 几种保偏光纤的截面结构

按 ITU-T 已给出的和不断修订的建议,可分为多模光纤 G.651,单模光纤 G.652、G.653、G.654、G.655、G.656、G.657; 还有其他相关的单模光纤,如色散平坦光纤 (DFF) 和色散补偿光纤 (DCF)。至今已有 G.651~G.657 等系列光纤产品种类,在抑制色散上各有特色,各种光纤的适用范围如表 2.1 所示。

表 2.1 各种光纤的适用范围

光纤类型	适用范围
G.651 光纤	工作在 850 nm 的短波长窗口,对于四次群以下的光纤通信系统较为实用。常用于局域网和数据链路
G.652 光纤	在 1 310 nm 波长性能最佳,是目前应用最广泛光纤。主要应用在 1310 nm 波长区开通长距离 622 Mb/s 及其以下系统,在 1550 nm 波长区开通 2.5 Gb/s, 10 Gb/s 和 $n \times 2.5$ Gb/s 波分复用系统
G.653 光纤	在 1550 nm 工作波长衰减系数和色散系数均最小。主要用于长距离、高速率,如 10 Gb/s 以上系统,其缺点是易受非线性影响,并产生较严重的四波混频效应 (FWM),它不支持波分复用系统
G.654 光纤	在 1550 nm 波长衰减系数最小,抗弯曲性能好。主要用于长距离海底系统
G.655 光纤	在 1550 nm 处有低色散保证,有抑制 FWM 等非线性效应,使得其能用在 EDFA 和 DWDM 系统,传输速率在 10 Gb/s 以上
G.656 光纤	2006 年 11 月发布了 V2.0 版由日本 NTT 公司和 CLPAJ 公司修订 G.656 光纤的基本规范。在 1460~1624 nm 波长范围,色散系数为 2~14 ps/nm.km,能有效抑制密集波分复用系统的非线性效应。G.656 光纤可保证通道间隔 100 GHz, 40 Gb/s 系统至少传 400 km
G.657 光纤	“G.657 接入网用弯曲衰减不敏感单模光纤光缆特性”的标准是 ITU-T 于 2006 年 11 月发布的标准。这类光纤最主要的特性是在 1260~1625 nm 波长具有优异的耐弯曲特性,其弯曲半径可实现常规的 G.652 光纤的弯曲半径的 1/4-1/2
DFF 光纤	优点是在 1310~1 550 nm 波段内为低色散。可与 G.652 光纤配合使用,降低光纤总色散
DCF 光纤	优点是在 1550 nm 内有很大的负色散,主要用于与 G.652 光纤配合使用由 1310 nm 扩容升级至 1550 nm 时进行色散补偿

按光纤的折射率分布进行分类, 由于光纤的折射率变化方式很多, 因此类别也很多, 若粗分, 可分为阶跃型和渐变型两种, 如图 2-5 所示。

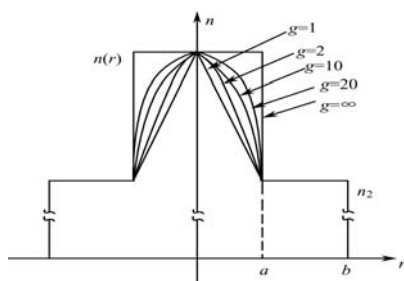


图 2-5 g 为不同值折射率

(1) 阶跃型光纤 SIF 的折射率可以表示为:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 (r < a) & \text{(纤芯)} \\ n_2 (r \geq a) & \text{(包层)} \end{cases}$$

(2) 渐变型光纤 GIF 的折射率可以表示为:

$$n(r) = \begin{cases} n(0) \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right]^{1/2} & (r < a) & \text{(纤芯)} \\ n(a) = n(0) [1 - 2\Delta]^{1/2} & (r \geq a) & \text{(包层)} \end{cases}$$

式中 $n(0)$ 是 $r=0$ 时纤芯中心的折射率; g 是折射率分布指数, 它取不同的值, 折射率分布不同。 r 为离开光纤轴心的距离, a 为纤芯半径 (μm), Δ 为相对折射率差。对阶跃型光纤: $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2$; 对渐变型光纤: $\Delta = [n^2(0) - n_2^2] / 2n^2(0)$ 。图 2-6 是几种典型的光纤折射率分布。

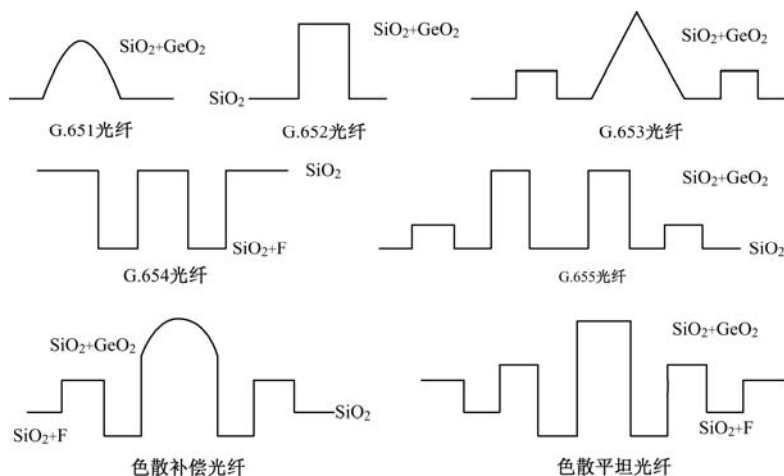


图 2-6 几种典型的光纤折射率分布图

从 G.656 光纤的应用范围可知, 它适用 S+C+L 三个波段。单模光纤的波段划分如表 2.2 所示。

表 2.2 单模光纤的波段划分

O 波段（原始波段 Original）	E 波段（扩展波段 -Extended）	S 波段（短波段 -Short）	C 波段（常规波 Conventional）	L 波段（长波段 -Long）	U 波段（超长波段-Ultralong）
1326~1360 nm	1360~1460 nm	1460~1530 nm	1530~1560 nm	1565~1625 nm	1625~1675 nm

2.1.2 光缆结构及类型

光缆和电缆一样由缆芯、加强构件、填充物和外护层等共同构成。目前常用的光缆结构有四种形式，即层绞式、骨架式、中心管式和带状式，如图 2-7~图 2-10 所示。

缆芯一般将带有涂覆层的单根或多根光纤合在一起再套上一层塑料管，并与不同形式的加强件和填充物组合在一起称为缆芯。

加强构件用于提高光缆施工的抗拉能力。在光缆中加一根或多根加强构件位于中心或分散四周，位于光缆中心的，称为中心加强，位于缆芯绕包一周的，称为铠装式加强。加强构件一般采用镀锌钢丝、多股钢丝绳、带有紧套聚乙烯垫层的镀锌钢丝、涤纶丝和玻璃增强塑料等。

光缆护层用来保护缆芯，使缆芯有效抵御一切外来的机械、物理、化学的作用，并能适应各种敷设方式和应用环境，保证光缆有足够的使用寿命。光缆护层是由内护层和外护层构成的多层组合体，内护层一般用聚乙烯（PE）和聚氯乙烯（PVC）等，外护层可根据敷设而定，可采用铝带和聚乙烯组成的 LAP 外护套加钢铠装等，起增强光缆抗拉、抗压、抗弯曲等机械保护作用。

在光缆缆芯的空隙中注满填充物（如石油膏），石油膏是光纤防淹的最后防线，它可有效地阻止潮气及水的渗入和扩散，以延缓潮气及水对光纤传输性能的影响，同时还能减少光纤的相互摩擦。

光缆结构设计要点主要是根据传输系统的容量、使用环境、敷设方式、制造工艺等，通过合理选用各种材料来完成光纤抵抗外界机械作用、温度变化和水作用等。

1. 层绞式光缆

层绞式光缆是在一根松套管内放置多根光纤，多根松套管围绕中心加强件绞合成一体，如图 2-7 所示。松套管由热塑性材料（如尼龙、聚丙烯等）做成，它对一次涂覆光纤起机械缓冲保护作用。松套管内充满油膏，层绞光缆中光纤密度较高，制造工艺较简单、成熟，是目前光缆结构的主流。

2. 骨架式光缆

骨架式光缆是由聚烯烃塑料绕中心加强件以一定的螺旋节距挤制而成，如图 2-8 所示。骨架槽为矩形槽，在槽中放置多根一次涂覆光纤或光纤带。这种结构的缆芯抗侧压力性能好。

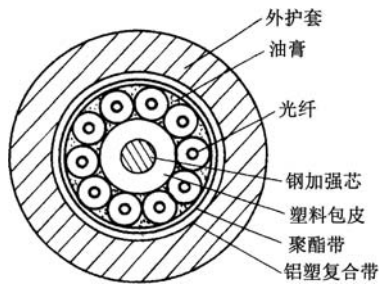


图 2-7 层绞式光缆

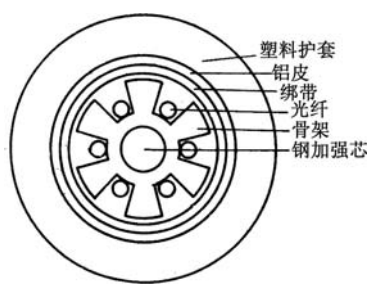


图 2-8 骨架式光缆

3. 中心束管式光缆

中心束管式光缆是把光纤束（多根光纤）或光纤带置于松套管中，外有皱纹钢带铠装层，该层外挤有高密度聚乙烯（HDPE）外护套，外护套中有两根平行于缆芯的轴对称加强芯，这种结构的光纤受压小，如图 2-9 所示。

4. 带状结构光缆

带状式光缆是把多根带状光纤单元（每根光纤带可放 4~16 根光纤），叠合起来，形成多个短形光纤叠层，放入松套管内，可做成束管式结构，如图 2-10 所示。带状式缆芯可以制成数百上千根光纤的高密度光缆，这种光缆已广泛应用于接入网中。

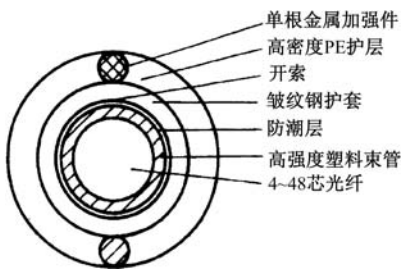


图 2-9 中心束管式光缆图

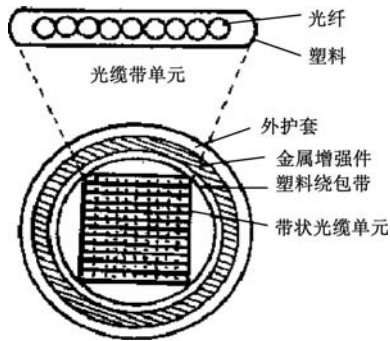


图 2-10 带状结构光缆图

2.1.3 光缆型号、规格及特性

光缆种类较多，具体型号与规格也多，根据《YD/T908-2000 光缆型号命名方法》的规定，目前光缆型号的命名由光缆型号代码和光缆中光纤的规格代码两部分组成，如图 2-11 所示。

1. 光缆型号代码及意义

(1) 分类代码及意义

- GY——通信用野外光缆；
- GJ——通信用局内光缆；

- GS——通信用设备内光缆；

• GH——通信用海底光缆；

• GT——通信用特殊光缆；

• GW——通信用无金属光缆；

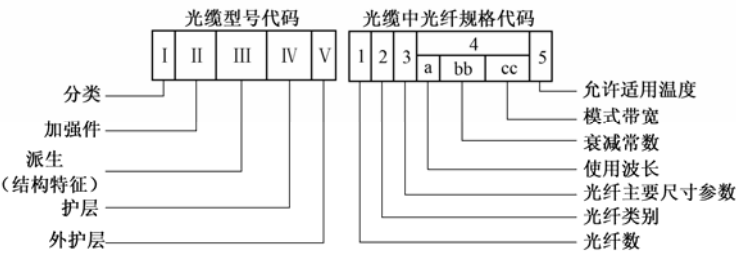


图 2-11 光缆型号与规格组成图

(2) 加强件代码及意义

- 无代号——金属加强件；

• F——非金属加强件；

• G——金属重型加强件；

• H——非金属重型加强件；

(3) 派生（结构特征）代码及意义

- B——扁平式结构；

• C——自承式结构；

• T——油膏填充式结构；

• D——带状结构；

• G——骨架槽结构；

• Z——阻燃结构；

• X——中心束管结构

• J——光纤紧套（被覆）结构；

(4) 护套代码及意义

- Y——聚乙烯护套；

• V——聚氯乙烯护套；

• U——聚氨酯护套；

• A——铝—聚乙烯粘接护套；

• L——铝护套；

• G——钢护套

(5) 外护套代码及意义

外护套是指铠装层及铠装层外边的外护层，外护套的代码两位数字组成。其含义如表 2.3 所示。

表 2.3 外护套的代码及含义

代 码	外护层材料	代 码	外护层材料
03	聚乙烯	33	细圆钢丝铠装加聚乙烯
23	双钢带绕包铠装加聚乙烯	44	粗圆钢丝铠装加聚乙烯和覆尼龙套
53	皱纹钢带铠装加聚乙烯	22	双钢带绕包铠装加聚氯乙烯套

2. 光缆中光纤规格代码及意义

(1) 光纤数

光纤数是表示光缆中同一类别光纤的实际纤数的数字。

(2) 光纤类别代码及意义

- J——SiO₂ 系列多模 GI 光纤；

• T——SiO₂ 系列多模渐变光纤；

• Z——SiO₂ 系列多模准突变型光纤；

• D——SiO₂ 系列单模光纤；

• X——SiO₂ 纤芯、塑料包层光纤；

• S——塑料光纤

(3) 光纤主要尺寸参数及意义

用阿拉伯数(含小数点数)及以 μm 为单位表示多模光纤的纤芯 / 包层的直径, 如 50/125 单位为 (μm) 或单模光纤的模场直径 / 包层直径单位为 (μm)。

(4) 传输特性代码及意义

光纤传输特性代码由波长的代码 a、衰减常数的代码 bb 及模式的代码 cc 共三组数字构成。其意义及用法为:

a 代表工作波长, 用数字来表示: 1: 使用波长在 $0.85\ \mu\text{m}$ 区域; 2: 使用波长在 $1.3\mu\text{m}$ 区域; 3: 使用波长在 $1.55\ \mu\text{m}$ 区域。

bb 代表衰减常数 α , 用 2 位数字顺序表示 α 的个位及小数后第一位数值。如 $\alpha=3.0$ (dB/km), 用 30 表示; $\alpha=0.5$ (dB/km), 用 05 表示; $\alpha=0.4$ (dB/km), 用 04 表示等。

cc 代表模式带宽, 用实际数字顺序表示, 单位为 ($\text{MHz} \cdot \text{km}$), 单模光纤无此项。

(5) 适用温度代码及意义

- A——适用于 $-40\sim+40\ (^{\circ}\text{C})$
- B——适用于 $-30\sim+50\ (^{\circ}\text{C})$
- C——适用于 $-20\sim+60\ (^{\circ}\text{C})$
- D——适用于 $-5\sim+60\ (^{\circ}\text{C})$

例如某光缆型号为 GYSTA03-12J50/125 (21008) C + 5 \times 4 \times 0.9, 则说明该光缆是: 有金属重型加强构件、松套填充式、铝—聚乙烯护层的通信用室外光缆, 包括 12 根芯径 / 包层直径为 50/125 μm 的二氧化硅系列多模渐变型光纤和 5 根用于远供及监测的铜线径为 0.9 mm 的四线组, 且在 $1.31\mu\text{m}$ 波长上, 光纤的损耗常数不大于 1.0 dB/km, 模式带宽不小于 800 MHz $\cdot\text{km}$; 光缆的适用温度范围为 $-20\sim+60\ ^{\circ}\text{C}$ 。

3. 光缆特性

光缆的主要特性有几何参数、光学特性、传输特性、机械特性和环境特性。光缆的光学特性和传输特性主要由光缆中光纤决定, 光缆对机械特性和环境特性的要求由使用条件决定。光缆的机械特性和环境特性决定光缆的使用寿命。这里重点简介光缆对机械特性和环境特性的要求。

光缆机械性能指标有拉伸、压扁、冲击、反复弯曲、扭转、曲绕等受力状态, 如表 2.4 所示。光缆出厂时要对机械性能指标按国标进行测试。光缆机械性具体要求如下。

表 2.4 光缆机械性能试验

序 号	项 目	方 法	试 验 条 件	
1	拉伸	GB 7425 · 2	试样有效长度 12 m, 以 10 mm/min 的拉伸速度, 最大拉力至光比缆标称张力, 维持 1 分钟, 然后逐渐解除拉伸	① 光纤不断裂; ② 光纤损耗监视; 试验中光功计变化 $\leq 0.05\ \text{dB}$; 试验解除后应无变化; ③ 护层无可见裂纹; ④ 有导是线光缆, 导电线应保持导通状态
2	压扁	GB 7425 · 3	试样取 5 个压点 (间隔 $>0.5\ \text{m}$), 每个压点的两个垂直径向各压一次, 受压面积为 10 cm, 最大压力至光缆标称侧压力	
3	冲击	GB 7425 · 4	试样取 5 个点 (间隔 $>0.5\ \text{m}$) 重垂落高为 1 m, 冲击次数不少于 3 次	
4	反复弯曲	GB 7425 · 5	心轴直径为 20 倍数缆径; 张力 (由产品指标定), 有效长度 1m, 由中央向左右曲 90° , 弯曲速度为每秒钟 1 外循环, 就不少于 10 个循环	
5	扭转	GB 7425 · 6	试样有效长度 1m, 一端悬吊重物 (重量由产品指标定, 一般 100 g 左右), 扭转角度为 $\pm 100^{\circ}$, 应不少于 10 个循环	

1) 抗拉伸性

光缆纵向所能承受的最大拉力取决于加强件的材料，一般要求在大于 1 km 的光缆的重量，多数光缆在 100~400 kg 范围。

2) 抗压扁性

光缆能够承受的最大侧压力取决于护套的材料结构。多数光缆能够承受的最大侧压力在 100~400 kg/10 cm 范围。

3) 抗冲击性

抗冲击性一般包括抗冲击、枪击和瞬间负荷增加。冲击和瞬间负荷增加是指光缆在极短时间内承受一定载荷的冲击后，光缆护套和缆内光纤损耗的变化情况。

抗枪击是指光缆在一定距离内承受铅弹射击的性能。架空光缆受猎枪射击的概率较高，为保证光纤的传输性能，要求光缆护层能为光纤提供足够的保护。

4) 抗弯曲性

抗弯曲性是指光缆的弯曲特性。当光缆在施工和使用中，受外力作用产生弯曲时，缆内光纤的传输损耗要发生变化。一般光缆最小弯曲半径在 200~500 mm。

5) 耐磨性

耐磨特性是指光缆护层的耐磨损性。在光缆的布放过程中，可能会出现护层磨损，当护层磨损超出一定范围后，光缆护层就不能起到保护作用，会为今后的使用埋下故障隐患。

研究光缆的环境特性主要包括光缆的温度特性、阻燃特性、护层完整性和阻水性。特别是光缆温度特性，重点关注在温度变化下的衰减、渗水、油脂滴流等问题。在我国一般要求光缆温度波动范围是低温地区-4~+40℃，高温地区-5~+60℃。

2.2 光纤传输原理分析

光纤的传输原理即光纤的导光原理，分析起来很复杂。分析光纤传输的理论方法有两种，即射线理论方法和波动理论方法。在光纤的芯径远远大于工作波长即 $2a \gg \lambda$ 时，用射线理论分析光纤导光原理是有效，因此射线理论适用于多模光纤。而用波动理论对光纤导光原理分析时，没有附加条件，并且更严密、更精确，但计算复杂，一般没有解析结果。这里先用射线理论对光纤导光原理作一些分析，并介绍一些重要的概念，然后再以波动理论进一步讨论光纤的传输原理。

2.2.1 射线理论分析光纤的传输原理

1. 基本光学定律

光独立传播定律认为，从不同光源发出的光线，以不同的方向通过介质某点时，各光线彼此互不影响，好像其他光线不存在似的。

光的直线传播和折射、反射定律认为，光在各向同性的均匀介质（折射率 n 不变）中，光线按直线传播。光在传播中遇到两种不同介质的光滑界面时，光发生反射和折射现象，如图 2-12 所示。光在均匀介质中的传播速度为：

$$V=c/n \quad (2.1)$$

式中, $c=3 \times 10^5$ km/s, 是光在真空中的传播速度; n 是介质的折射率(空气的折射率为 1.002 7, 近似为 1, 玻璃的折射率为 1.45 左右)。

反射定律为反射线位于入射线和法线所决定的平面内, 反射线和入射线处于法线的两侧, 反射角等于入射角, 即有:

$$\theta_1 = \theta'_1 \quad (2.2)$$

折射定律为折射线位于入射线和法线所决定的平面内, 折射线和入射线位于法线的两侧, 且满足:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.3)$$

光在传播过程中, 若从一种介质传播到另一种介质的交界面时, 因两种介质的折射率不等, 将会在交界面上发生反射和折射现象。一般将折射率较大的介质称为光密媒质, 折射率小的称为光疏媒质。图 2-12 (a) 中, $n_2 > n_1$, 光线以 θ_1 入射角由光疏媒质向光密媒质入射时, 将会发生折射并且入射角 θ_1 大于折射角 θ_2 ; 当光线从光密媒质向光疏媒质入射时, 如图 2-12 (b) 所示。此时入射角 θ_1 小于折射角 θ_2 , 当 $\theta_2 = 90^\circ$ 时, 则入射角 $\theta_1 = \theta_c$ (临界角), 根据折射定律得出: $\theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$, 只要入射角 $\theta_1 > \theta_c$, 此时就会产生全反射, 如图 2-12 (c) 所示。无论是反射还是折射, 它们都遵循反射定律和折射定律。

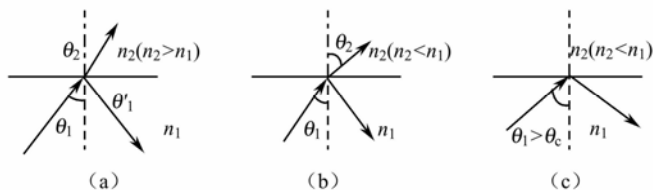


图 2-12 光的反射和折射

2. 光纤中光的传播

当一束光线从光纤端面耦合进光纤时, 光纤中有两种运行的光线: 一种是光线始终在一个包含光纤中心轴的平面内传播, 并且一个传播周期与中心轴相交两次, 这种光线常称为子午线, 含光纤中心轴的固定平面就称为子午面, 如图 2-13 (a) 所示。另一种是光线在传播过程中, 其传播时的轨迹不在同一个平面内, 并不与光纤中心轴相交, 这种光线就称为斜射光线, 如图 2-13 (b) 所示。

当子午线在阶跃光纤中传播时, 其传播原理如图 2-14 所示。若纤芯半径为 a , 折射率 n_1 , 包层折射率为 n_2 并且有 $n_1 > n_2$ 。当光线①以 ϕ_1 角从空气 ($n_0=1$) 入射到光纤端面时, 将有一部分光进入光纤, 此时 $n_0 \sin \phi_1 = n_1 \sin \theta_2$ 。由于纤芯折射率 $n_1 > n_0$ 空气, 则 $\theta_2 < \phi_1$, 光线继续传播以 $\theta_2 = (90^\circ - \theta_1)$ 角射到纤芯和包层的界面处。如果 θ_1 小于纤芯包层界面的临界角 $\theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$, 则一部分光线折射进包层最终被溢出而损耗掉, 另一部分反射进入纤芯。但如此几经反射、折射后, 很快就被损耗掉了。如果 ϕ_1 减小到 ϕ_0 如光线②, 则 θ_2 也减小到 θ_{20} , 即 $\theta_{20} = (90^\circ - \theta_c)$, 而 θ_1 增大。如果 θ_1 增大到略大于临界角 θ_c 时, 则此光线将会在纤芯和包层界面发生全反射, 能量全部反射回纤芯。当它继续再传播再次遇到芯包界面时, 再次发生全反射。如此反复, 光线就能从一端沿着折线传到另一端。

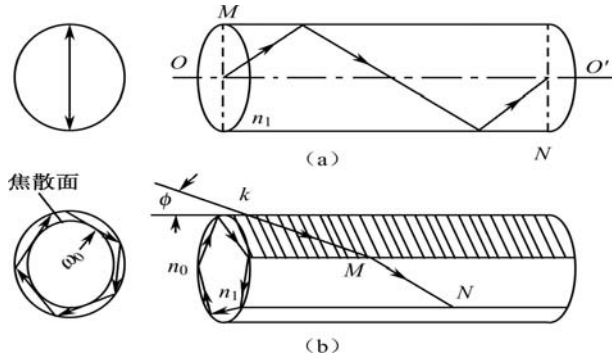


图 2-13 光纤中的射线

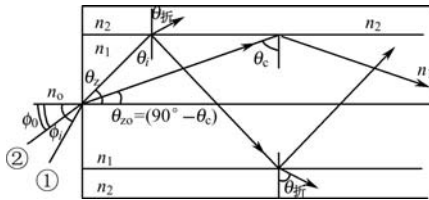


图 2-14 光纤中的子午线传播

下面分析一下 ϕ_i 要小到多少时，才能将光线由光纤的一端传到另一端。假设 $\phi_i=\phi_0$ 时， $\theta_z=\theta_{z0}$ ， $\theta_r=\theta_c$ ，则有：

$$\begin{aligned} n_0 \sin \phi_0 &= n_1 \sin \theta_{z0} = n_1 \sin (90^\circ - \theta_c) = n_1 \cos \theta_c \\ n_1 \cos \theta_c &= n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{aligned} \tag{2.4}$$

式中， $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 \approx (n_1 - n_2) / n_1$ 定义为光纤的相对折射率差。

由式（2.4）可推出 ϕ_0 为纤芯端面的最大入射角，可定义光纤数值孔径（Numerical Aperture, NA）为

$$NA = n_0 \sin \phi_0 = n_1 \sqrt{2\Delta} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{2.5}$$

NA 表征了光纤收集光的能力。凡是入射角 ϕ_i 小于圆锥角 ϕ_0 的光线都可以满足全反射条件，将被束缚在纤芯中沿轴向传播。由式（2.5）可见， n_1 ， n_2 相差越大，即 Δ 越大，光纤的数值孔径越大，其集光能力越强。而通信用光纤的数值孔径较小，故称为弱导光纤。

【例 2-1】 设某光纤纤芯折射率 $n_1=1.5$ ，光纤相对折射率差 $\Delta=0.01$ ，试求该光纤的数值孔径和最大入射角。

解：由数值孔径的定义有：

$$NA = n_0 \sin \phi_0 = n_1 \sqrt{2\Delta} = 1.5 \sqrt{2 \times 0.01} \approx 0.21$$

从而可求得最大入射角近似为：

$$\phi_0 = \sin^{-1} NA \approx 12.2^\circ$$

当子午射线在渐变型光纤中传播时，传播轨迹是自聚焦的。渐变型光纤纤芯的折射率随光纤半径 r 的增加而逐渐减小，直到等于包层的折射率，如图 2-15 所示。要分析渐变型光纤中光线的传播，可以采用与数学中“积分定义”相同的办法。先将光纤纤芯分成无数

多个同心的薄圆柱层，每一层的厚度很薄，折射率在每一层中近似为常数，邻层的折射率有一阶跃差，但相差很小。一个渐变型光纤的子午面及分层示意，见图 2-15，各层之间的折射率满足以下关系： $n(r_0) > n(r_1) > n(r_2) > n(r_3) > \dots > n(r)$ 。若有一光线以 ϕ 角从光纤端面入射，其在多层折射率分布光纤中以传播入射角 θ_1 射到 1, 2 层的分界面时，由于光线是从光密介质射向光疏介质，其折射角 θ'_1 将比 θ_1 大；由图可知，此光线又以 $\theta_2 = \theta'_1$ 为新的入射角在 2, 3 层界面发生折射；依次类推。由于光都是由光密介质向光疏介质传播，其入射角将会逐渐增大，即有： $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4 < \theta_5 \dots$ ，直到某一界面处入射角大于临界角时，光线在此处发生全反射。此后光线以完全对称的轨迹，一层层由疏到密方向折向中心轴，此时，随光线向中心传播，在相应各层的入射角会因各层折射率的增加而减小，并穿越中心轴。由于中心轴下方的折射率分布和上方完全一样，随后又产生全反射，折回中心轴。继而又重新以 θ_1 角入射到 1, 2 层界面，周而复始，这样光线就能从一端传输到另一端了。

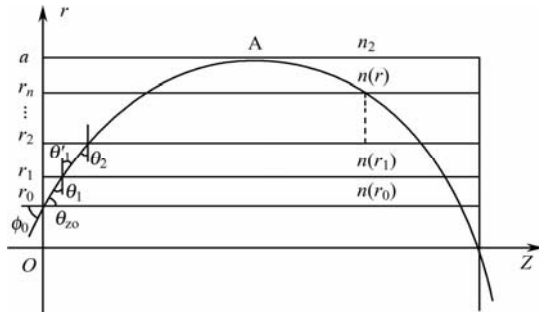


图 2-15 渐变折射率光纤中的子午曲线

下面再分析一下被分成 N 层的渐变型光纤的导光条件，也就是说，要使光线限制在光纤中传播，而不被泄漏（辐射）到光纤外，光纤端面的入射角 ϕ 必须满足什么条件。显然光线必须在 N 层前的界面上发生全反射，或最迟也必须在 N 层与包层界面上发生全反射。因此，若入射光线是以临界状态在端面以 ϕ_0 角入射，那么此光线从第一层到第 N 层都会受到折射，致使纤芯内入射角逐渐增大，并一定能使第 N 层与包层界的入射角之间满足 $\theta_N \geq \theta_c$ 。

根据光线的折射和全反射定律，有：

$$n(r_0)\sin\theta_1 = n(r_1)\sin\theta_2 = n(r_2)\sin\theta_3 = \dots = n(r)\sin\theta \quad (2.6)$$

同理得出：

$$n(r_0)\sin(90^\circ - \theta_{z0}) = n(r_1)\sin(90^\circ - \theta_{z1}) = n(r_2)\sin(90^\circ - \theta_{z2}) = \dots = n(r)\sin(90^\circ - \theta_z)$$

从上式可得：

$$n(r_0)\cos\theta_{z0} = n(r_1)\cos\theta_{z1} = \dots = n(r)\cos\theta_z$$

射线上任一点符合下列关系：

$$n(r_0)\cos\theta_{z0} = n(r)\cos\theta_z$$

在转折点 A 处，射线与光纤轴平行，则：

$$\cos\theta_z = 1, \quad n(r) = n_2$$

式中， n_2 为包层的折射率。从而：

$$n(r_0)\cos\theta_{z0} = n_2, \quad \cos\theta_{z0} = n_2/n(r_0)$$

设 θ_{z0} 所对应的 ϕ_0 为最大入射角，又由于：

$$n_0 \sin \phi_0 = n(r_0) \sin \theta_{z0} = n(r_0) \sqrt{1 - \cos^2 \theta_{z0}} = n(r_0) \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n^2(r_0)}}$$

从而求出光纤的本地数值孔径：

$$\text{NA}(r_0) = n_0 \sin \phi_0 = n(r_0) \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n^2(r_0)}} = \sqrt{n^2(r_0) - n_2^2} \quad (2.7)$$

在渐变折射率光纤中，相对折射率指数差定义为：

$$\Delta = \frac{n^2(0) - n_2^2}{2n^2(0)}$$

式中 $n(0)$ ， n_2 分别是 $r=0$ 处和纤芯与包层界面上的折射率。

由此可见，要使光线全部限制在光纤纤芯中， ϕ_0 角必须满足式 (2.7) 的关系，即 ϕ_0 角的大小只与入射点的折射率和包层折射率有关，而与中间各层的折射率无关；在光纤的轴线上，折射率最大，数值孔径也最大。随着 ϕ_0 角的减小，光线将在离第一层更近处发生全反射。

如果 N 趋于无穷大，每层的厚度趋于零，相邻层之间的折射率趋于连续变化，此时图 2-15 的传播轨迹应是一条斜率连续变化的曲线。

综上所述，光纤之所以能够导光，就是利用纤芯折射率略高于包层折射率的特点，使落在数值孔径角 ϕ_0 内的光线都能收集到光纤中，并都能在纤芯包层界面处以内形成全反射，从而将光限制在光纤中传播，这就是光纤的导光原理。由光纤的数值孔径可以找出光纤中的光功率沿光纤半径 r 的分布情况。

由于渐变光纤纤芯折射率是变化的，所以纤芯端面上不同点的集光能力是不同的，依赖本地数值孔径。设光源对光纤均匀激发，纤芯处和离轴线为 r 处的功率密度各为 $p(0)$ ， $p(r)$ ，则有：

$$\frac{p(r)}{p(0)} = \frac{\text{NA}^2(r)}{\text{NA}^2(0)} = \frac{n^2(r) - n_2^2}{n^2(0) - n_2^2} \quad (2.8)$$

式 (2.8) 说明是某点数值孔径越大，收集到的光功率越强。

对于光纤中斜射线的传播，用射线理论分析导光原理相当麻烦。这是因为斜射线的传播不像子午线那样在一个平面内传播，而是在一个三维的立体空间中螺旋式前进的，如图 2-13 (b) 所示。要分析它必须利用三维坐标，比较抽象，但其基本导光原理同子午线方式相同，故不作详细分析。

2.2.2 波动理论分析光纤的传输原理

波动理论对光在光纤中传输详细情况的分析，是以求解特定边界条件下的麦克斯韦方程为基础，来获得电磁场分布，从而分析光纤传输特性。根据求解麦克斯韦方程的不同，又分为严格矢量分析法和近似的标量分析法，本节只介绍阶跃光纤的标量解法。

对于作时谐振荡的光波，在阶跃光纤中满足矢量亥姆霍兹方程：

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 n^2 \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (2.9-a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k_0^2 n^2 \mathbf{H} = 0 \quad (2.9-b)$$

式中, \mathbf{E} 是电场强度; \mathbf{H} 是磁场强度; $k_0=2\pi/\lambda$ 是真空中波数; λ 是真空中光波长; n 是介质的折射率。矢量亥姆霍兹方程在任何正交坐标系中都是适用的, 在分析时可将矢量方程简化为直角坐标系中任一分量标量亥姆霍兹方程。下面先从 E_z, H_z 分量的标量亥姆霍兹方程入手, 再通过场的横向分量与纵向分量的关系, 求出其他横向场分量。

1. 标量解法

由于光纤是弱导光纤, 光纤中传输的波非常接近 TEM 波, 其 E_z 和 H_z 非常小, 因此可先求横向场分量, 再求纵向场分量 E_z 和 H_z (实际光纤中除传输 TEM 波外, 还传输 TM、TE 波, 故存在 E_z, H_z 分量)。同时定义阶跃光纤的圆柱坐标系如图 2-16 所示。

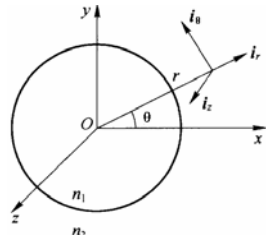


图 2-16 光纤的坐标系

在弱导光纤中横向电场偏振方向在传输过程中保持不变, 可用一个标量来描述。设横向电场的偏振方向沿 Y 轴方向, 它满足标量亥姆霍兹方程:

$$\nabla^2 E_y + k_0^2 n^2 E_y = 0 \quad (2.10-a)$$

式中, E_y 为电场在直角坐标 y 轴的分量。选用 (r, θ, z) 使 z 轴与光纤轴线一致。将式 (2.10-a) 在圆柱坐标中展开, 得到电场的 y 分量 E_y 的亥姆霍兹方程为:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_y}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 E_y = 0 \quad (2.10-b)$$

可以利用变量分离法求解 E_y 。

(1) 将 E_y 写成三个变量乘积形式, 即设试探函数为:

$$E_y = AR(r)\Theta(\theta)Z(z) \quad (2.11-a)$$

式中, $R(r), \Theta(\theta), Z(z)$ 分别是 r, θ, z 的函数, 它分别表示 E_y 随三个坐标参数变化的情况, A 是常数。常规解法应将 E_y 函数形式代入式 (2.10-b) 中, 设法求出 $R(r), \Theta(\theta), Z(z)$ 的解, 从而得到 E_y 的解。但这种求法比较复杂, 现只根据物理概念出发, 可直接写出 $\Theta(\theta)$ 和 $Z(z)$ 的形式, 再通过方程求解 $R(r)$ 。

(2) 根据物理概念, 写出 $\Theta(\theta)$ 和 $Z(z)$ 的形式。 $Z(z)$ 表示导波沿光纤轴向的变化规律, 因导波是沿 z 向传播的, 它沿该方向呈行波状态。用 β 表示其轴向相位常数, 则:

$$Z(z) = Ae^{-j\beta z} \quad (2.11-b)$$

$\Theta(\theta)$ 表明 E_y 沿圆周方向的变化规律。它沿该方向是以 2π 为周期的简谐函数, 因而可写成:

$$\Theta(\theta) = \begin{cases} \cos m\theta \\ \sin m\theta \end{cases} \quad (2.11-c)$$

当 θ 变化 2π 时, 场又重复原来的数值, $m=0, 1, 2, 3, \dots$ 。为了在边界上匹配, 纤芯和包层中的 $\Theta(\theta)$ 函数应按同样规律变化。

(3) 求出 $R(r)$ 的形式, $R(r)$ 描述导波沿 r 方向的变化规律。将式 (2.11) 代入式 (2.10-b), 并考虑纤芯和包层中的折射率为 n_1 和 n_2 , a 为纤芯半径, 则得:

$$r^2 \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + r \frac{dR(r)}{dr} + [(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)r^2 - m^2]R(r) = 0 \quad r \leq a \quad (2.12-a)$$

$$r^2 \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + r \frac{dR(r)}{dr} + [(k_0^2 n_2^2 - \beta^2)r^2 - m^2]R(r) = 0 \quad r \geq a \quad (2.12-b)$$

经过数学处理，可将纤芯和包层中方程分别化为标准的贝塞尔方程。对于贝塞尔方程求解，有多种形式，取什么样的解要根据物理意义来确定。导波在光纤纤芯中应为振荡解，故其解取第一类贝塞尔函数；在包层中应是衰减解，故其解取第二类修正的贝塞尔函数解。于是 $R(r)$ 可写为：

$$R(r) = J_m[(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2} r] \quad r \leq a \quad (2.13-a)$$

$$R(r) = K_m[(\beta^2 - n_2^2 k_0^2)^{1/2} r] \quad r \geq a \quad (2.13-b)$$

式中， J_m 为 m 阶第一类贝塞尔函数； K_m 为 m 阶第二类贝塞尔函数。这两种函数的曲线如图 2-17 所示。

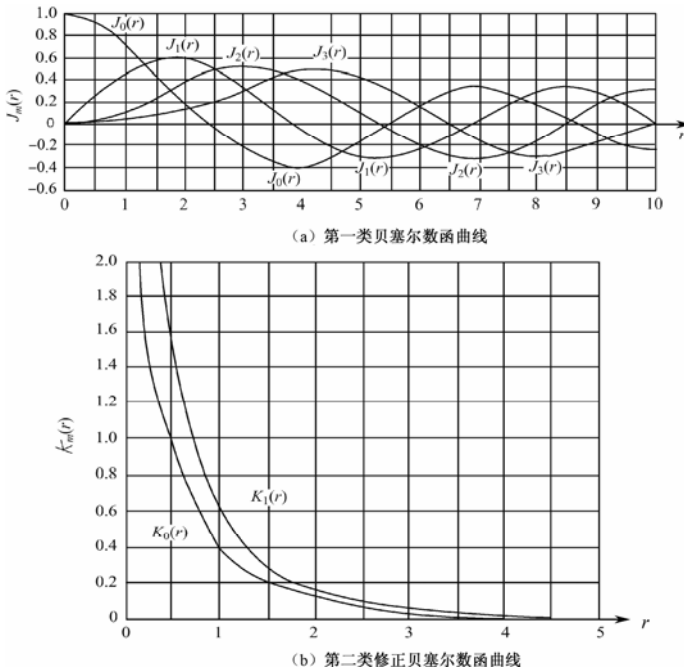


图 2-17 贝塞尔函数曲线

为了使分析具有一般性，引入光纤几个重要的无量纲参数。

在纤芯和包层中，令：

$$U = (k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2} a \quad (2.14-a)$$

$$W = (\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2} a \quad (2.14-b)$$

式中， U 叫作导波径向归一化相位常数； W 叫作导波径向归一化衰减常数。它们分别表示在光纤的纤芯和包层中导波场沿径向 r 的分布情况。

由 U 和 W 可引出光纤的另一个参数，即归一化频率 V ：

$$V = (U^2 + W^2)^{1/2} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} k_0 a = \sqrt{2\Delta} n_1 k_0 a \quad (2.15)$$

亦即:

$$V = \sqrt{2\Delta} n_1 k_0 a = \frac{2\pi n_1 a \sqrt{2\Delta}}{\lambda_0}$$

由式(2.15)知, V 与光纤的结构参数 a , 相对折射率指数差 Δ , n_1 及工作波长(包含在 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 中)相关, 是一个重要的综合参数, 光纤的很多特性都与 V 有关。

(4) E_y 的标量解。将 $R(r)$, $\Theta(\theta)$, $Z(z)$ 代入式(2.11-a), 并考虑到式(2.14)的关系, 式(2.11-a)变成:

$$E_{y1} = e^{-j\beta z} \cos m\theta A_1 J_m(Ur/a) \quad r \leq a \quad (2.16-a)$$

$$E_{y2} = e^{-j\beta z} \cos m\theta A_2 K_m(Wr/a) \quad r \geq a \quad (2.16-b)$$

这里 $\Theta(\theta)$ 取了余弦函数的解。

利用光纤的边界条件可确定式中的常数。首先根据边界条件找出 A_1, A_2 之间的关系。在 $r=a$ 处, 因 $E_{y1} = E_{y2}$, 可得 $A_1 J_m(U) = A_2 K_m(W) = A$, 将此式代入式(2.16)中, 得:

$$E_{y1} = A e^{-j\beta z} \cos m\theta J_m(Ur/a) / J_m(U) \quad r \leq a \quad (2.17-a)$$

$$E_{y2} = A e^{-j\beta z} \cos m\theta K_m(Wr/a) / K_m(W) \quad r \geq a \quad (2.17-b)$$

根据平面电磁波 TEM 的性质, 有 $Z = Z_0/n = -E_y/H_x$ 。光纤中的电磁波近似为 TEM 波, 于是 H_x 的表示式为:

$$H_{x1} = -\frac{n_1}{Z_0} E_{y1} \quad r \leq a \quad (2.18-a)$$

$$H_{x2} = -\frac{n_2}{Z_0} E_{y2} \quad r \geq a \quad (2.18-b)$$

其中, $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon}$ 是自由空间波阻抗。

由麦克斯韦方程组, 可求出纵向场 E_z, H_z 与横向场 E_y, H_x 之间的关系:

$$E_z = (j/\omega\epsilon) \frac{dH_x}{dy} = \frac{jZ_0}{k_0 n^2} \frac{dH_x}{dy} = -\frac{j}{k_0 n} \frac{dE_y}{dy} \quad (2.19-a)$$

$$H_z = (-j/\omega\mu_0) \frac{dE_y}{dx} = -\frac{j}{k_0 Z_0} \frac{dE_y}{dx} \quad (2.19-b)$$

将 E_y, H_x 代入上式, 即可求出 E_z, H_z 。有了电磁场的纵向分量 E_z, H_z , 可以通过麦克斯韦方程组导出电磁场横向分量 E_r, H_r 和 E_θ, H_θ 的表达式。具体的方程组较复杂, 这里不再给出, 请参阅相关文献。

2. 标量解的特征方程

标量解的特征方程, 可由边界条件得出。在 $r=a$ 处, 令 $E_{z1}=E_{z2}$, 忽略 n_1 和 n_2 之间的微小差别, 即令 $n_1=n_2$, 可得

$$\begin{cases} U \frac{J_{m+1}(U)}{J_m(U)} = W \frac{K_{m+1}(W)}{K_m(W)} \end{cases} \quad (2.20-a)$$

$$\begin{cases} U \frac{J_{m-1}(U)}{J_m(U)} = -W \frac{K_{m-1}(W)}{K_m(W)} \end{cases} \quad (2.20-b)$$

根据贝塞尔函数的递推公式可以证明, 式(2.20)中的两式是相等的, 因而可选其一求

解。从中解出 U （或 W ）值，从而确定 W （或 U ）和相位常数 β ，确定光纤中的场分布及其特性。由于式（2.20）是超越方程，须用数值法求解，很复杂，故下面只讨论它在截止和远离截止两种情况下的解。

3. 光纤的标量模 LP_{mn} 及其特性

LP_{mn} 模是指弱导光纤中传播的模式近似为 TEM 的波，它具有横向场 (x, y) 极化方向不变（线极化）的特点，可认为它是线性偏振模，用 LP_{mn} 来表示，下标 m, n 的值表明各模式的场型特征。不同的模式，有不同的场结构（图案），但如果它们具有相同的传输常数 $\beta=k_z$ 值，则认为这些模式是简并的。 LP_{mn} 由 $HE_{m+1, n}$ 和 $EH_{m-1, n}$ 模线性叠加而成，例如， LP_{0n} 模由 HE_{1n} 模得到； LP_{1n} 模由 HE_{2n}, TM_{0n} 和 TE_{0n} 模线性组合而得； LP_{2n} 模由 HE_{3n} 模和 EH_{1n} 模线性组合获得，依次类推。

(1) LP_{mn} 模的截止条件 V_c

当某一模式截止时，它已不能沿光纤有效传输了，通常以径向归一化衰减常数 W 来衡量。若导波电磁场在纤芯外的包层沿半径方向几乎是按指数快速衰减的，电磁能量就集中在纤芯中，此时， $W^2>0$ 。如果 $W^2<0$ ，即 W 为虚数，包层中电磁场不再沿半径方向衰减，而是振荡的，成为辐射模。 $W^2=0$ 作为导波发生截止的标志。将截止时的 W 记作 W_c ，当 $W_c=0$ 时，对应的归一化径向相位常数记作 U_c ，归一化截止频率记作 V_c ，于是可得下列关系：

$$V_c^2 = U_c^2 + W_c^2 = U_c^2 \text{ 或 } V_c = U_c \tag{2.21}$$

下面从各类模式截止条件下的特征方程出发，分别讨论它们的截止特性。

由截止条件下的特征方程 $W_c=0$ ，得：

$$U_c J_{m-1}(U_c)/J_m(U_c) = W_c K_{m-1}(W_c)/K_m(W_c) = 0 \tag{2.22}$$

由此可得： $U_c \neq 0$ ，进而得 $J_{m-1}(U_c = \mu_{cmn}) = 0$ 。

在 LP_{mn} 模的归一化截止频率 $V_{cmn} = U_{cmn}$ 时，若 $m=0$ ，从 LP_{0n} 模的特征方程： $J_1(U_c) = J_1(U_c) = 0$ ，可解出： $n=1, 2, 3, \dots$ 的 $U_c = \mu_{1, n} = V_{c1, n} = 0, 3.831\ 71, 7.015\ 59, 10.173\ 47, \dots$ 如图 2-18 所示。如 LP_{01} 模的 $U_c=0, V_c=0$ ，意味着该模式无截止波长、无截止情况，此模称为基模。第二个归一化截止频率较低的模式是 LP_{11} 模，称为二阶模，其 $V_c=U_c=2.4048$ 。其他模式的 $V_c=U_c$ 值更大，基模以外的模式统称为高次模。表 2.5 列出了部分较低阶 LP_{mn} 模截止时的 U_c 值。

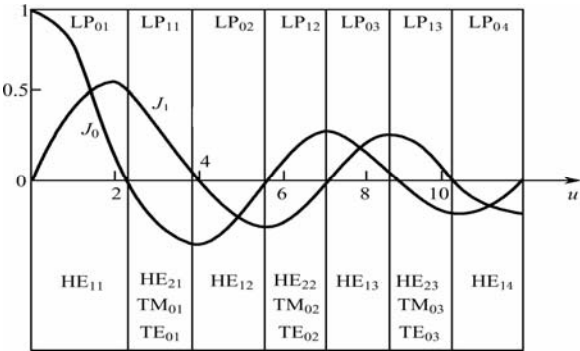


图 2-18 $m=0, 1$ 模式的 U 值变化范围

表 2.5 截止情况下的 LP_{mn} 模的 U_c 值

<div><div><div><div><div></div><div><i>m</i></div></div></div><div><div><div><i>n</i></div><div></div></div></div></div></div>	0	1	2
1	0	2.4048	3.8317
2	3.8317	5.5201	7.0156
3	7.0156	8.6537	10.1735

对某一光纤，每个模式都对应有一个截止波长 λ_c ，当工作波长 $\lambda < \lambda_c$ 时，该模式可以传输；当 $\lambda > \lambda_c$ 时，该模式就截止了。由归一化截止频率 V_c ，可求出该模式的截止波长 λ_c ：

$$V_c=2\pi n_1(2\Delta)^{1/2}a/\lambda_c$$

(2.23)

$$\lambda_c=2\pi n_1(2\Delta)^{1/2}a/V_c$$

(2.24)

注意，在阶跃光纤中，对某一模式而言，无论光纤中什么参数发生变化，它的归一化截止频率 V_c 是不变的，但该模式的截止波长却会因光纤不同而不同。由 V_c 可分析判断光纤能允许哪些模式在其中传输，若 $V > V_c$ 时，此模式不会截止；若 $V < V_c$ 时，此模式截止。

通常把只能传输一种模式的光纤称为单模光纤，单模光纤只传输一种模式，即基模 LP₀₁或 HE₁₁，所以它不存在模式色散且带宽极宽，一般都在几十 GHz·km 以上，可实用于长距离大容量的通信。要保证单模传输，需要二阶模截止，即让光纤的归一化频率 V 小于二阶模 LP₁₁ 归一化截止频率，从而可得：

$$0 < V < V_c(\text{LP}_{11})=2.4048$$

这一重要关系称为“单模传输条件”。

以上用波动理论分析光纤的导光原理针对的是阶跃光纤，有关渐变光纤的波动理论解法，由于渐变光纤的折射率随 r 而变，用波动理论求解变得很困难。迄今为止，只对平方律折射率分布光纤才有标量近似解。在此不叙述。

(2) LP_{mn} 模的传导条件，大 V 值（远离截止）情况下的 U 值

如前所述，LP_{mn} 模的归一化频率 V 是由光纤的参数和工作波长来确定的，那么 LP_{mn} 模中哪些能在光纤中传导呢？根据电磁场理论，只要 V 大于 LP_{mn} 模所对应归一化截止频率 V_c ，则该 LP_{mn} 模可以传导。而每一个 LP_{mn} 模对应的 V_c 值都是有限的值。这里讨论 V 值，实际上是在光纤中可传导的 LP_{mn} 模的分布情况进行讨论。

光纤中的 U 和 W 值与 V 值有关，即光纤中的场也随 V 值而变。当光纤归一化频率很大时，光纤中的 U 和 W 值与 V 值有关，光纤的 V 值越大，传输的模式越多，越不容易截止。在极限情况下， $V \rightarrow \infty$ 表示场完全集中在纤芯中，在包层中的场为零。因 $V=2\pi n_1(2\Delta)^{1/2}a/\lambda_0$ ，当 $V \rightarrow \infty$ ，有 $a/\lambda_0 \rightarrow \infty$ 。表明光波相当于在折射率为 n_1 的无限大空间 ($a \rightarrow \infty$) 中传播。此时其相位常数 $\beta \rightarrow k_0 n_1$ ，于是有：

$$W=(\beta^2-k_0^2n_2^2)^{1/2}a=k_0(n_1^2-n_2^2)^{1/2}a=\frac{2\pi(n_1^2-n_2^2)^{1/2}a}{\lambda_0} \rightarrow \infty$$

将其代入式 (2.20-a) 可得在 $W \rightarrow \infty$ 条件下的特征方程：

$$UJ_{m+1}(U)/J_m(U)=WK_{m+1}(W)/K_m(W) \rightarrow \infty$$

由此可得： $J_m(U)=0$ ，进而可确定远离截止情况时传导模对应的 U 值。

设 μ_{mn} 代表 m 阶第一类贝塞尔函数的第 n 个根。由 $J_m(U)=0$ ，可得出 $U=\mu_{mn}$ ，较低阶的 μ_{mn} 值如表 2.6 所示。

表 2.6 大 V 值情况下的传导模 LP_{mn} 的 U 值

<div><div><div><div><div></div><div>n</div></div><div><div>m</div></div></div></div></div>	0	1	2
1	2.4048	3.8317	5.1356
2	5.5201	7.0156	8.4172
3	8.6537	10.1735	11.6198

对应一对 m, n 值，就有一确定的 U 值，从而就有确定的 W 及 β 值。对应着一确定的场分布和传输特性。这个独立的场分布就叫做光纤中的一个模式，即为标量模 (LP_{mn})。如 $m=0, n=1, U=2.4048$ ，对应传导模式为 LP_{01} 。依次类推。另外 LP_{mn} 符号中 m, n 值还有一种明确的物理意义，它们表示对应传导模式的场在横截面上的分布规律。 m 表示沿圆周方向电场出现最大值的个数，而 n 表示沿半径方向电场出现最大值的个数。 m 代表贝塞尔函数的阶数， n 代表根的序号。

由式 (2.16) 可知， LP_{mn} 模在光纤中的横向电场为：

$$E_y = Ae^{-j\beta z} \cos m\theta J_m(Ur/a) / J_m(U)$$

其圆周及半径方向的分布规律各为： $\Theta(\theta)=\cos m\theta$ 和 $R(r)=J_m(Ur/a)$ 。例如：

当 $m=0$ 时， $\Theta(\theta)=\cos m\theta=1$ ，电场在圆周方向无变化，亦即在圆周方向，电场出现最大值的个数是零。

当 $m=1$ 时， $\Theta(\theta)=\cos m\theta=\cos \theta$ ，即在圆周方向电场按余弦规律变化，当 θ 在 $0\sim 2\pi$ 变化时，沿圆周方向出现一对最大值。

当 $m=2$ 时， $\Theta(\theta)=\cos m\theta=\cos 2\theta$ 。当 θ 在 $0\sim 2\pi$ 变化时，沿圆周出现两对最大值，其余依次类推。

电场沿半径方向，按贝塞尔函数规律变化，其变化情况与 n 有关。以 $m=0$ 的 LP_{0n} 模为例，其场沿 r 方向的变化为 $R(r)=J_0(Ur/a)$ ，它按零阶的规律变化。如 LP_{01} 模， $U=\mu_{01}=2.4048$ ， $R(r)=J_0(2.4048r/a)$ ，在 $r=0$ 处， $R(r)=1$ ；而在 $r=a$ 处， $R(r)=J_0(2.4048)=0$ ，其沿 r 的变化情况如图 2-19 (a) 所示，沿半径有一个最大值。又如 LP_{02} 模， $U=\mu_{02}=5.5201$ ， $R(r)=J_0(5.5201r/a)$ ，在 $r=0$ 处， $R(r)=1$ ；在 $r=a$ 处， $R(r)=J_0(5.5201)=0$ 。在 $r=0.4357a$ 处， $R(r)=J_0(2.4051)=0$ 。其沿 r 的变化情况如图 2-19 (b) 所示，沿半径有两个最大值。其余依次类推。可见 n 表示场沿半径最大值的个数。

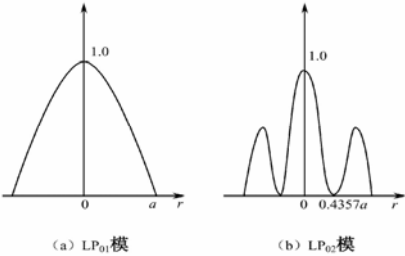


图 2-19 LP_{0n} 模的场沿半径的变化

以上场分布,是在 $V \rightarrow \infty$ 时的情况。此时电场完全集中在光纤纤芯中,在包层中的场为零。随着 V 值的减小,电场将向包层中伸展。

2.3 光纤的结构参数

光纤的结构参数主要有光纤的几何参数、折射率分布、数值孔径、模场直径和截止波长等。这些参数与光纤横截面径向 r 有关,与光纤的长度及传输状态无关。

2.3.1 几何参数

光纤的几何参数与工程有紧密的联系,为了使光缆线路实现光纤的低损耗连接,光纤制造厂商按照 ITU-T 及 IEC (国际电工委员会) 的建议,对光纤的几何参数进行了严格的控制和筛选。

多模光纤的几何参数包括:纤芯直径、包层直径、纤芯不圆度、包层不圆度、纤芯与包层的同心度等;单模光纤的几何参数为包层直径、包层不圆度、纤芯与包层的同心度误差(模场与包层的同心度误差)等。

1) 纤芯直径与外径

纤芯直径,主要是对多模光纤的要求。ITU-T 规定多模光纤的纤芯直径为 $50 \pm 3 \mu\text{m}$ 。

包层直径又称光纤的外径,它是指裸纤的直径。无论多模光纤、单模光纤,ITU-T 规定通信用光纤的外径均为 $125 \pm 3 \mu\text{m}$ 。

2) 芯/包层同心度和不圆度

同心度是指纤芯中心和包层中心之间距离与芯径 ($2a$) 之比。

不圆度包括芯径的不圆度和包层的不圆度,用下式表示:

$$N_C = (D_{\max} - D_{\min}) / D_{\text{co}} \quad (2.25)$$

式中, D_{\max} 和 D_{\min} 是纤芯(包层)的最大和最小直径; D_{co} 是纤芯(包层)的标准直径。光纤的不圆度严重时将影响连接时的对准效果,增大接头损耗。因此,ITU-T 规定:光纤同心度误差小于 6%,单模光纤的模场中心和包层中心之间距离误差在 1310 nm 波长不大于 $1 \mu\text{m}$,纤芯不圆度小于 6%;包层不圆度(包括单模)小于 2%。

2.3.2 折射率分布和数值孔径

多模光纤的折射率分布决定多模光纤的带宽和连接损耗;单模光纤的折射率分布决定单模光纤的截止波长、模场直径和色散。因此,一般要求设计出的折射率分布具有使光纤宽带宽、低色散、小的损耗系数,并有合理的横截面结构,以减少生产成本。

数值孔径是多模光纤的重要参数之一,它表征了多模光纤接收光的能力,同时对光源耦合效率、光纤微弯损耗的敏感性和带宽有着密切的关系,数值孔径大,容易耦合,微弯敏感小,带宽较窄。ITU-T 对单模光纤没有把数值孔径作为正式参数。阶跃型光纤数值孔径的定义为:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.26)$$

式中, n_1 为阶跃光纤纤芯的折射率; n_2 为包层的折射率。而渐变型光纤的本地数值孔径为:

$$NA = \sqrt{n^2(r) - n_2^2} \quad (2.27)$$

2.3.3 模场直径

模场直径是单模光纤特有的一个参数。模场是指光纤中基模 LP_{01} 模的电场强度随空间变化的

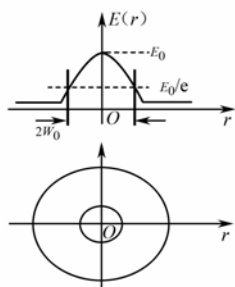


图 2-20 基模近场功率分布图

的分布, 如图 2-20 所示。模场直径是描述基模 LP_{01} 近场光斑的大小, 其定义是设 LP_{01} 模的电场强度分布为 $E(r)=E_0\exp(-r^2/W_0^2)$, 取其最大值的 E_0/e 处所对应光纤横截面径向 r 上两点之间的宽度为模场直径, 用 $2W_0$ 表示。模场直径估算为: $2W_0 = 2\lambda / \pi n_1 \sqrt{\Delta}$ 对 $\lambda=1.31 \mu\text{m}$, $n_1=1.5$, $\Delta=0.36\%$, $2W_0 = 2\lambda / (\pi n_1 \sqrt{\Delta}) = 2 \times 1.31 / (3.14 \times 1.5 \times \sqrt{0.36\%}) = 9.27 \mu\text{m}$ 。单模光纤之所以用模场直径的概念, 而不用纤芯的几何尺寸作为特征参数, 是因为单模光纤中的场并不是完全集中在纤芯中, 而是有相当部分能量在包层中。模场直径是描述单模光纤中光能量集中的程度的。从工程角度而言, 模场直径失配的光纤连接损耗较大。ITU-T 规定模场直径为 $(9 \sim 10) \pm 1 \mu\text{m}$ 。

2.3.4 截止波长

截止波长是单模光纤所特有的结构参数, 它给出了保证单模传输的光波长范围。所谓截止波长, 是指二阶模 LP_{11} 不能传播的波长。单模光纤单模传输时, 要求光纤通信系统的工作波长必须大于截止波长, 否则单模光纤将工作在双模区, 产生模式色散和模式噪声, 从而导致传输性能恶化和带宽下降。截止波长对于光纤设计制造意义重大。由于实际的截止波长与光纤长度和所处状态有关, 目前 ITU-TG650 中已定义了 3 种实际测试的截止波长即光纤截止波长 (λ_c)、成缆光纤截止波长 (λ_{cc})、跳线光缆光纤的截止波长 (λ_{cj})。

1) 理论截止波长 λ_{ct}

$$\lambda_{ct} = \frac{2\pi}{V_c} n_1 a \sqrt{2\Delta} \quad (2.28)$$

式中, V_c 为 LP_{11} 模的归一化截止频率, 对于阶跃光纤 $V_c=2.405$, 对平方律光纤 $V_c=3.518$; n_1 为纤芯的折射率; a 为光纤半径; Δ 为相对折射率差。

2) 光纤截止波长 λ_c

光纤截止波长是对包含一个半径为 140 mm 环的其他部分平直的 2 米长一次涂覆光纤测得的截止波长。

3) 成缆光纤的截止波长 λ_{cc}

ITU-T 建议在 22 m 的光缆上进行弯曲之后, 测得的二阶模 LP_{11} 的截止波长定义为 λ_{cc} 。成缆光纤的截止波长反映了典型敷设条件下, 光缆中光纤的截止波长。 λ_{cc} 估算式为:

$$\lambda_{cc} = 0.8\lambda_{ct} + 0.19(\mu\text{m}) \quad (2.29)$$

从 λ_{cc} 估算式可看出 $\lambda_{cc} < \lambda_{ct}$ 。目前成缆光纤的 λ_{cc} 值为 $1.10 \sim 1.28 \mu\text{m}$ 。

4) 跳线光缆光纤的截止波长 λ_{cj}

一根两端都带有光纤活动接头的单芯或多芯软光缆称为跳线。一般跳线长度有 2 米、5 米、10 米、20 米之分,测试截止波长时,选用跳线长度不应超过 20 米光纤,测得的二阶模 LP_{11} 的截止波长定义为 λ_{cj} 。

在实际应用中,这 4 种截止波长有以下关系:

$$\lambda_{ct} > \lambda_c > \lambda_{cj} > \lambda_{cc} \quad (2.30)$$

光纤的截止波长一般由光纤制造商测定。光缆截止波长实质上要比光纤截止波长短,对于系统设计者而言,光缆截止波长更为有用。

2.4 光纤的传输特性

光信号经过一定距离的光纤传输后要产生衰减和畸变,使输入的光信号脉冲和输出的光信号脉冲不同,其表现为光脉冲的幅度会衰减和波形会被展宽。产生该现象的原因是光纤中存在损耗和色散。损耗和色散是描述光纤传输特性的最主要参数,它们限制了系统的传输距离和传输容量。本节主要介绍光纤中引起光信号能量衰减和畸变的各种特性,包括损耗、色散和非线性效应。

2.4.1 损耗特性

光纤的损耗将导致传输信号的衰减,所以把光纤的损耗又称衰减。光信号在光纤中传输,随着距离增长光的强度随之减弱,其规律为:

$$P(z) = P(0)10^{-\alpha(\lambda)z/10}$$

式中, $P(0)$ 为输入光纤的光功率,即 $z=0$ 处注入光功率; $P(z)$ 为传输距离 z 处的光功率; $\alpha(\lambda)$ 为波长 λ 处的光纤衰减系数。当 $z=L$ 时,光纤衰减系数为:

$$\alpha(\lambda) = \frac{10}{L} \lg \frac{P(0)}{P(L)} \quad (\text{dB/km}) \quad (2.31)$$

当工作波长为 λ 时,在光纤上两个相距 L 的总衰减 $A(\lambda)$,用下式表示:

$$A(\lambda) = \alpha(\lambda) \times L \quad (\text{dB}) \quad (2.32)$$

光纤通信可以说是伴随着光纤制造水平不断提高,即光纤损耗的不断降低而发展起来的。光纤损耗是决定光纤通信系统中继距离的主要因素之一。造成光纤损耗的原因很多,主要有吸收损耗、散射损耗和附加损耗,其损耗产生机理也非常复杂,简要说明如表 2.7 所示。

1. 吸收损耗

吸收损耗是光波通过光纤材料时,一部分光能被消耗(吸收)转换成其他形式的能量而形成。吸收损耗主要包括:本征吸收、杂质吸收(OH^- 离子)和结构缺陷吸收。

表 2.7 光纤的传输损耗

光纤本身的传输损耗	吸收损耗	材料杂质吸收	过渡金属正离子吸收 (Cu ²⁺ ,Fe ²⁺ ,Cr ²⁺ ,Co ²⁺ ,Ni ²⁺ ,Mn ²⁺ ,V ²⁺ ,Po ²⁺) 在可见光与近红外波段吸收; OH ⁻¹ 根负离子吸收 (OH ⁻¹ 的吸引峰在 0.95 μm, 1.23 μm, 1.37 μm)
		材料固有吸收 (基本材料本征吸引)	紫外区吸引 (电荷转移波段) 近红外区吸引 (分子振动波段)
	散射损耗	波导结构散射 (制作不完善造成)	折射率分布不均匀引起的散射 光纤芯径不均匀引起的散射 纤芯与包层界面不平引起的散射 晶体中气泡及杂物等引起的散射
		材料固有散射	瑞利散射 受激拉曼散射 受激布里渊散射
光纤使用时引起的传输损耗	接续损耗 (包括活动接续和固定接续)		固有因素: 芯径失配、折射率分布失配、数值孔径失配、同心度不良等 外部因素: 纤芯位置的横向偏差、纤芯位置的纵向偏差 (活接头存在, 熔接头没有)、光纤的轴向角偏差、光纤端面受污染
	弯曲损耗		在敷设和连接光缆时, 光纤的弯曲半径小于容许弯曲半径所产生的损耗
	微弯曲损耗		光纤轴产生微米级弯曲引起的损耗

本征吸收分红外和紫外吸收。红外吸收是指光通过 SiO₂ 构成石英玻璃时分子共振引起的光能吸收现象。例如: SiO₂ 的吸收峰分别为 9.1 μm, 12.5 μm, 21.3 μm。如在 9.1 μm 的吸收损耗高达 10¹⁰ dB/km。对掺锗的石英光纤系列, 若不考虑掺锗浓度对损耗的影响, 可以“dB/km”为单位用下面的经验公式估算红外吸收的损耗系数:

$$\alpha_{ir} = 7.81 \times 10^{11} \times e^{-48.28/\lambda}$$

其中λ是工作波长, 单位为μm, 当λ=1.55 μm 时, α_{ir}≈0.02 dB/km, 其影响较小。但当λ=1.70 μm 时, α_{ir}≈0.32 dB/km。可见红外吸收影响了工作波长向更长波长方向发展。

紫外吸收是光波照射激励电子跃迁至高能级时吸收的能量。这种吸收发生在紫外波长区, 故通常为紫外吸收。对掺锗的光纤, 若Δ<0.4%, 可以“dB/km”为单位用如下经验公式估算紫外吸收的损耗系数:

$$\alpha_{uv} = 1.47 \times 10^{-2} \times B \times e^{4.63/\lambda}$$

其中, B 是掺锗的重量百分比, 当λ=1.31 μm, B=3.5%时, α_{uv}≈1.75×10⁻² dB/km。但当λ=0.60 μm 时, α_{uv}≈1.00 dB/km。可见紫外吸收随λ减少和掺锗浓度增加而增加。

杂质吸收是玻璃材料中含有铁、铜等过渡金属离子和 OH 离子, 在光波激励下由离子振动产生的电子阶跃吸收光能而产生的损耗。

2. 散射损耗

散射损耗是由于材料的不均匀使光散射将光能辐射出光纤外的损耗。光纤的散射损耗主要有瑞利散射、米氏散射、受激布里渊散射、受激拉曼散射、附加结构缺陷散射、弯曲散射和泄漏等。

光纤制造时, 由于熔融态玻璃分子的热运动引起其内部结构的密度不均匀和折射率起伏故对光产生散射, 比光波长小得多的粒子引起的散射称为瑞利散射; 与光波同样大小的粒子引起的散射称为米氏散射。

引起光纤损耗的散射主要是瑞利散射, 瑞利散射具有与短波长的 $1/\lambda^4$ 成正比的性质, 即: $\alpha_R = A/\lambda^4$ 。对掺铒的光纤而言, $A \approx 0.63 \text{ dB}\mu\text{m}^4/\text{km}$ 。对于 λ 分别 $0.85 \mu\text{m}$ 、 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 时, 则 α_R 分别约为 1.3 dB/km 、 0.3 dB/km 和 0.1 dB/km 。除瑞利散射损耗较大外, 其他散射损耗只是瑞利散射损耗的百分之一。

3. 附加损耗

附加损耗属于来自外部的损耗或称应用损耗, 如在成缆、施工安装和使用运行中使光纤扭曲、侧压等造成光纤宏弯和微弯所形成的损耗等。微弯是在光纤成缆时随机性弯曲产生的, 所引起附加损耗一般很小, 光纤宏弯曲损耗是最主要的。在光缆接续和施工过程中, 不可避免地出现弯曲, 它的损耗原理如图 2-21 所示。

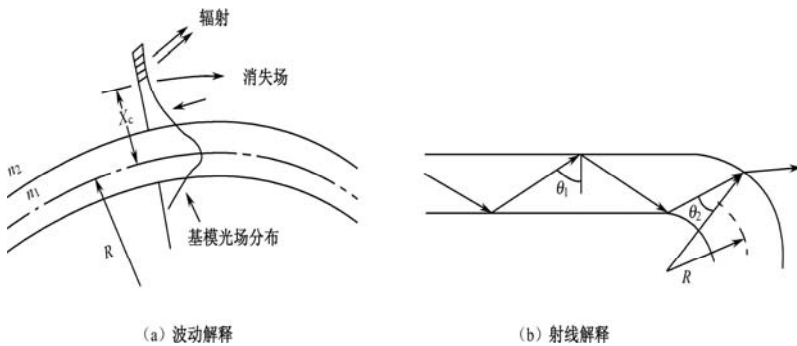


图 2-21 光纤弯曲辐射损耗

以“dB/km”为单位, 宏弯曲损耗 α_T 可近似表示为:

$$\alpha_T = C_1 e^{-C_2 R}$$

式中, C_1 , C_2 是与曲率半径 R 无关的常数。光纤宏弯曲程度越大, 曲率半径减小, 损耗越大。当弯曲程度不大时, 其弯曲损耗可以忽略, 但当弯曲半径 R 小到某一值时, 宏弯损耗将不能忽略, 此时的弯曲半径为临界弯曲半径 R_c , 其估算公式为:

$$R_c \approx \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}}$$

可以看到, 大的纤芯、包层折射率差, 有小的临界弯曲半径。例如, $n_1=1.5$, $\Delta=0.2\%$, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$, 则 $R_c=975 \mu\text{m}$, 显然该值是相当小的。在施工过程中严格规定了光缆的允许弯曲半径, 把弯曲损耗降低到可忽略不计的程度。

随着光纤制造技术的提高, 杂质吸收、结构不完善等产生的损耗已降到很小。因此, 目前高质量的光纤, 其损耗已达到或接近理论计算值。图 2-22 为光纤中光功率损耗系数随波长变化的频谱曲线。从图中可知, 波长 $1.38 \sim 1.4 \mu\text{m}$ 的峰值损耗为最大。图中存在 3 个低损耗窗口: $0.85 \mu\text{m}$, $1.3 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$, 对应于光纤已开发应用的波段为 $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 的短波段, 损耗约为 2 dB/km ; $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 长波段中, $1.3 \mu\text{m}$ 波长的损耗已达 0.5 dB/km ; 在

1.55 μm 波长上的损耗低达 0.154 dB/km。

如果在制造工艺上进一步采取措施，降低 OH 离子含量，将改善光纤的波长损耗特性，有可能实现按波长划分多群复用，进一步增大光纤的传输容量。

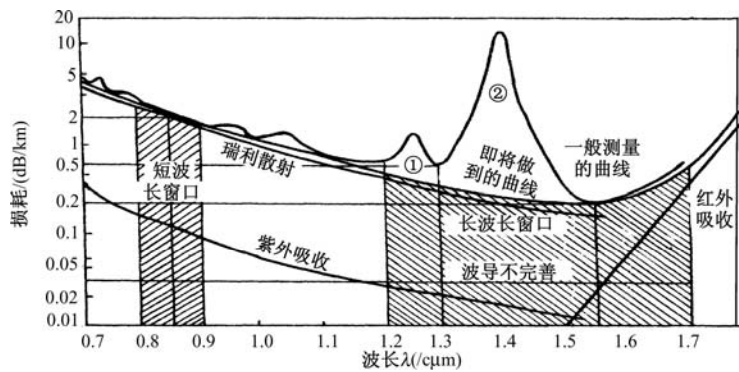


图 2-22 光纤损耗频谱曲线

2.4.2 色散特性和带宽

在物理学中，色散是指不同颜色的光经过透明介质后被分散开的现象。光纤色散是指引起传输光信号畸变的现象。

在光纤中，信号的不同模式或不同频率在传输时具有不同的群速度，因而信号达到终端时会出现传输时延差，从而引起信号畸变，这种现象统称为色散。对于数字信号，经光纤传播一段距离后，色散会引起光脉冲展宽，严重时，前后脉冲将互相重叠，形成码间干扰，导致误码率增加。因此，色散决定了光纤的传输带宽，限制了系统的传输速率或中继距离。色散和带宽是从不同的角度来描述光纤的同一特性的。

根据色散产生的原因，光纤的色散主要分为：模式色散、材料色散、波导色散和偏振模色散。下面分别给予介绍。

1. 模式色散

模式色散一般存在于多模光纤中。因为，在多模光纤中同时存在多个模式，不同模式沿光纤轴向传播的群速度是不同，它们到达终端时，必定会有先有后，出现时延差，形成模式色散，从而引起脉冲宽度展宽，如图 2-23 所示。

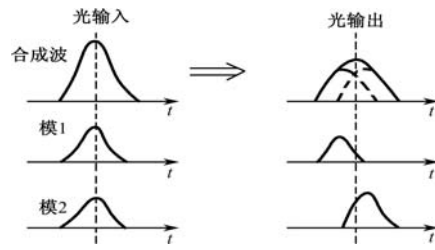


图 2-23 模式色散的脉冲展宽

现以阶跃型多模光纤为例，对其最大模式色散进行估算。在多模阶跃光纤中，传输最

快和最慢的两条光线分别是沿轴心传播的光线①和以临界角 θ_c 入射的光线②,如图2-24所示。因此,在阶跃型多模光纤中最大色散是光线②所用时间 τ_{\max} 和光线①所用时间 τ_{\min} 到达终端的时间差 $\Delta\tau_{\max}$:

$$\Delta\tau_{\max} = \tau_{\max} - \tau_{\min}$$

根据几何光学,设在长为 L 的光纤中,光线①和②沿轴方向传播的速度分别为 c/n_1 和 $c/n_1\sin\theta_c$ 。因此光纤的模式色散为:

$$\Delta\tau_M = \Delta\tau_{\max} = L \left[\frac{c}{n_1} \sin\theta_c \right] - L / (c/n_1) = \frac{Ln_1}{c} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \approx \frac{Ln_1}{c} \Delta \quad (2.33)$$

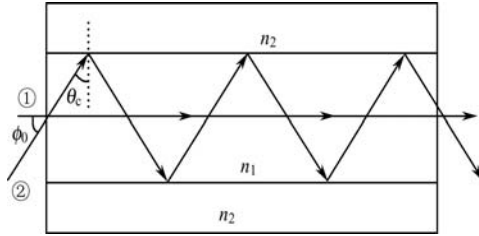


图 2-24 多模阶跃光纤的模式色散

可以看出最大时延差与 Δ 成正比,使用弱导光纤(n_1 和 n_2 相差很小 $\Delta \approx (n_1 - n_2)/n_1$)有助于减少模式色散。例如 $\Delta=1\%$,石英光纤的 $n_1=1.5$,光纤长1 km,根据式(2.33)可求得该光纤的模式色散 $\Delta\tau_{\max}=50$ ns。由此可见,当光纤的长度越长,模式色散就越大;当相对折射率差 Δ 越大,模式色散就越严重。

2. 材料色散

由于光纤材料的折射率随光波长的变化而变化,使得光信号各频率的群速度不同,引起传输时延差的现象,称为材料色散。这种色散取决于光纤材料折射率的波长特性和光源的线谱宽度。

在数字光纤通信系统中,实际使用的光源的输出光并不是单一波长,而是具有一定的谱线宽度。由于光纤材料的折射率是波长的函数,光在其中的传播速度 $V(\lambda)=C/n(\lambda)$ 也随光波长而变。当具有一定谱线宽度的光源所发出的光脉冲入射到单模光纤内传输时,不同波长的光脉冲将有不同的传播速度,在到达输出端时将产生时延差,从而使脉冲展宽。这就是材料色散的产生机理。

若已知群速度为: $V_g=d\omega/d\beta$,其中, β 为光波相位常数, ω 为光的角频率,那么单位长度的群时延为: $\tau_0=1/V_g=n_1/c$,则长度为 L 的光纤材料色散 $\Delta\tau_m$ 为:

$$\Delta\tau_m = -\frac{L}{c} \lambda \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \Delta\lambda \quad (\text{ps})$$

式中, c 为真空中光速; n_1 为纤芯折射率; λ 为光波长, $\Delta\lambda$ 为光源谱线宽度,且 $\Delta\lambda=\lambda_2-\lambda_1$ 是以 λ 为中心的波长范围。

一般情况下,常用色散系数这个物理量来衡量色散的大小。材料色散系数 D_m 定义为:

$$D_m = \frac{\Delta\tau_m}{\Delta\lambda \times L} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} [\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})] \quad (2.34)$$

可见，色散系数为单位谱线宽度下传播单位长度光纤所造成的色散。如果已知光纤的材料色散系数，根据式（2.34）很容易求出材料色散为：

$$\Delta\tau_m = D_m \times \Delta\lambda \times L \quad (2.35)$$

【例 2-2】 设某光纤在 1.31 μm 波长的最大材料色散系数 $D_m = 3.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ，如用一中心波长为 1.31 μm 的半导体激光器产生传输光，其谱线宽度为 $\Delta\lambda = 4 \text{ nm}$ ，试求出该光传输 1km 长度光纤的材料色散。

解：由式（2.35），容易求出其材料色散为：

$$\Delta\tau_m = D_m \times \Delta\lambda \times L = 3.5 \times 4 \times 1 = 0.014 \text{ ns} = 14 \text{ ps}$$

由此例可见材料色散还是较小的，比阶跃型多模光纤中的模式色散小得多。另外还要指出，一根光纤的色散系数（不单指材料色散系数）可能是正数，也可能是负数。在光纤中，群时延 $\tau(\lambda)$ 随载波波长的增加而增加，或者说波长越长的光波其传播速度越慢，此时的色散系数为正值，称为正色散；反之，波长较短的光波传播更快，这里的色散系数为负值，称为负色散。显然若将两根色散系数符号相反的光纤熔接起来，材料色散会得到改善。

3. 波导色散

波导色散 $\Delta\tau_w$ 是针对光纤中某个导模而言的，在不同的波长下，其相位常数 β 不同，从而群速度不同，引起色散。波导色散还与光纤的结构参数、纤芯与包层的相对折射率差等多方面的原因有关，故也称为结构色散。不过波导色散 $\Delta\tau_w$ 很小，用波导色散系数 D_w 表示：

$$D_w = -\frac{n_1 \Delta}{c\lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad (2.36)$$

式中， Δ 为相对折射率差； n_1 为纤芯折射率； V 为归一化频率； $b = W^2/V^2$ 为归一化相位常数； W 为归一化衰减常数， D_w 的单位为 $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。光纤的波导色散可用下式计算：

$$\Delta\tau_w = D_w \times \Delta\lambda \times L \quad (2.37)$$

4. 偏振色散（PMD）

对于理想单模光纤，由于只传输一种模式（基模 LP_{01} 或 HE_{11} 模），故不存在模式色散，但存在偏振模色散。偏振模色散是单模光纤特有的一种色散，偏振模色散的产生是由于单模光纤中实际上传输的是两个相互正交的偏振模，它们的电场各沿 x 、 y 方向偏振，分别记作 LP_{01}^x 和 LP_{01}^y ，其相位常数 β_x 、 β_y 不同（ $\beta_x \neq \beta_y$ ），相应的群速度不同，它们沿光纤传输产生时延差，导致脉冲的展宽，即引起偏振模色散 PMD，如图 2-25 所示。图中 $\Delta\tau$ 即为两个偏振模分量之间的群时延差 DGD，也称为 PMD。单位长度偏振色散 $\Delta\tau_0$ 计算式如下：

$$\Delta\tau_0 = \tau_x - \tau_y = \frac{d\beta_x}{d\omega} - \frac{d\beta_y}{d\omega} = \frac{d\Delta\beta}{d\omega} \approx \frac{\Delta\beta}{\omega} \approx \frac{1}{c}(n_x - n_y) \quad (2.38)$$

式中， τ_x 、 τ_y 为这两个模式传输单位长度所用的时间； $\Delta\beta = \beta_x - \beta_y = n_x k_0 - n_y k_0$ ， ω 为光的角频率； k_0 为真空中的相位常数； n_x 、 n_y 是 LP_{01}^x 、 LP_{01}^y 模的等效折射指数。

造成单模光纤 PMD 的内在原因是纤芯的椭圆度和残余内应力，引起相互垂直的本征偏振以不同的速度传输，进而造成数字系统的光脉冲展宽和模拟系统的信号失真，传输速率受限。造成单模光纤 PMD 的外在原因则是成缆和敷设时的各种作用力，即压力、弯曲、扭转及光缆连接等。

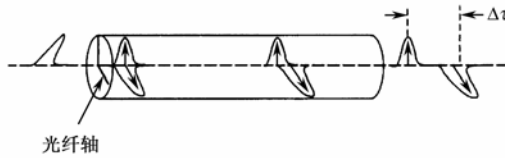


图 2-25 偏振模色散

人们已认识到 PMD 对大容量数字和模拟通信系统的影响是严重的。若要 10 Gb/s 以上的高速系统能正常工作, 光脉冲展宽必须限制在一定范围, 即 L 长度光纤链路的最大 DGD_L 应该在 30% 光脉冲宽度以下。实验证明, 当光路的光功率代价 P_p 为特定值时, L 长度光纤链路的最大 DGD_L 有对应容限。例如, 对于 10 Gb/s 系统, 其光脉冲宽度为 100 ps, 当 P_p 为 1 dB 时, DGD_L 最大容限为 30 ps; 对于 40 Gb/s 系统, 其光脉冲宽度只有 25 ps, 当 P_p 为 1 dB 时, DGD_L 最大容限只能为 10 ps 以下, 若超出 10 ps 的脉冲展宽则会使接收端无法正确地恢复原信号。由此可知, 速率高于 40 Gb/s 的系统, 对光纤 PMD 值的要求成为至关重要的考虑因素。而 PMD 值是随机变化的, 它与光纤制作过程、光缆成缆过程、光缆敷设过程、外界温度变化等有关。实际上常用总群时延差 DGD_L 的平均值, 即 PMD 系数 (PMD_C) 来表征光纤光缆的 PMD 特性。

PMD 与光纤的平均总双折射 ($\Delta\beta = \beta_x - \beta_y$) 和平均偏振模耦合长度 h 存在重要关系:

当光纤长度很短时 ($L \ll h$), PMD 近似与光纤长度 L 成正比, 其计算公式如下:

$$PMD_L = DGD_L = PMD_C \times L \quad (\text{ps}) \quad (2.39)$$

当光纤长度 L 足够长时 ($L \gg h$, 典型值为 2km 以上), 此时由于沿光纤产生足够多模式耦合, 快和慢的偏振模之间伴随着能量交换, 这将会降低脉冲展宽, PMD 与长度的平方根成正比, 其计算公式如下:

$$PMD_L = DGD_L = PMD_C \times \sqrt{L} \quad (\text{ps}) \quad (2.40)$$

式中, L 为光纤长度 (km); PMD_L (或 DGD_L) 为长度 L 光纤的总偏振模色散 (或偏振模总群时延差) (ps); PMD_C 为光纤的 PMD 系数 (单位为 $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$)。

PMD_C 的典型值在 $0.1 \sim 1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 之间。在 PMD_C 和 DGD_L 之间存在一种换算关系, 从 DGD_L 最大容限可计算出对应 PMD_C 的要求。如在 400 Gb/s 的高速系统中, 传输 100 km 后, PMD_C 限制在 $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 以内。一般系统对 PMD 系数的最大设计值为 $0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。

综上所述, 在多模光纤中存在着模式色散、材料色散和波导色散三种色散, 而且这三种色散之间存在: 模式色散 \gg 材料色散 $>$ 波导色散的大小关系。在单模光纤中, 模式色散为零, 其色散主要是材料色散、波导色散和偏振色散, 而且材料色散占主导, 波导色散较小, 偏振色散一般可以忽略。因此光纤色散可表示为:

$$\text{多模光纤色散: } \Delta\tau = (\Delta\tau_M^2 + \Delta\tau_m^2 + \Delta\tau_w^2)^{1/2} \quad (2.41)$$

$$\text{单模光纤色散: } \Delta\tau = (\Delta\tau_m^2 + \Delta\tau_w^2 + \Delta\tau_0^2)^{1/2} \quad (2.42)$$

不过单模光纤一般只给出色散系数 D , 其中包含了材料色散和波导色散的共同影响。

5. 光纤的带宽

在常规速率光纤传输系统中, 光纤的色散特性可以用脉冲展宽 $\Delta\tau$ 、光纤的带宽 B_0 和光

纤的色散系数 D 三个物理量来描述。

脉冲展宽 $\Delta\tau$ 是光脉冲经过传输后在时间座标轴上展宽的程度，是色散特性在时域的描述。而带宽 B_0 是这一特性在频域描述。在频域中对于调制信号而言，光纤可以被看做是一个低通滤波器。当调制信号的高频分量通过它时，就会受到严重衰减。ITU-T 建议 1 km 的光纤带宽计算公式为：

$$B_0 = \frac{\varepsilon \times 10^6}{D \times \Delta\lambda \times 1} \quad (\text{MHz}) \quad (2.43)$$

单位长度光纤的脉冲展宽量 $\Delta\tau$ 与色散系数 D 的关系为：

$$\Delta\tau = D \times \Delta\lambda \times 1 \quad (2.44)$$

L 公里的光纤带宽计算公式为：

$$B_L \approx \frac{B_0}{L} = \frac{\varepsilon \times 10^6}{D \times \Delta\lambda \times L} \quad (\text{MHz}) \quad (2.45)$$

式中， D 的单位为 ps/nm.km； $\Delta\tau$ 的单位为 ps；光源谱宽 $\Delta\lambda$ 的单位为 nm；光纤的带宽 B_0 单位为 MHz；常数 $\varepsilon=0.115$ （多纵模激光器）， $\varepsilon=0.306$ （单纵模激光器）。

在 DWDM 高速光纤传输系统中，着重考虑 PMD 对光纤距离影响情况，可由下列公式分析：

$$L = \left[\frac{1}{10\text{PMD}_C \times B_L} \right]^2 \text{ 或 } B_L = \frac{1}{10\text{PMD}_C \sqrt{L}} \quad (2.46)$$

其中， PMD_C 为偏振模色散系数 ($\text{s}/\sqrt{\text{km}}$)， B_L 为传输速率 (b/s)， L 为光纤中继距离 (km)。

2.4.3 光纤双折射及偏振特性

双折射与偏振是单模光纤特有的问题。理想的单模光纤存在电场沿 x, y 方向上的线偏振模 LP_{01}^x 和 LP_{01}^y ，该两模式有相同的相位常数 $\beta_x = \beta_y$ ，它们是相互简并的。但实际光纤总有某种程度的不完善。如纤芯椭圆变形，光纤横向不对称应力，光纤弯曲等，使两模式之间的简并被破坏 ($\beta_x \neq \beta_y$)。这种现象叫作模式双折射。双折射现象表现在两种模式的群速度不同，因而引起偏振色散 PMD，使光纤带宽变窄。另一方面可以利用双折射，制成保偏光纤，为相干光纤通信提供新的传输光纤。

1. 线双折射参数

可用下列参数说明单模光纤线双折射特性。

线双折射率 $\Delta\beta_L$ 定义为两正交线偏振模的相位常数之差。

$$\Delta\beta_L = \beta_x - \beta_y$$

归一化双折射率 B 是线双折射率与真空中的相位常数 k_0 之比。

$$B = \Delta\beta_L / k_0 = (\beta_x - \beta_y) / k_0 = n_x - n_y = \Delta n_{\text{eff}}$$

式中， Δn_{eff} 是等效折射指数差， $k_0 = 2\pi/\lambda$ ， λ_0 为真空中的工作波长。

拍长 L_B 定义为偏振态完成一个周期变化的光纤长度，如图 2-26 所示。在一个拍长上，两正交偏振光的相位差变化 2π ，因而有 $\Delta\beta_L \times L_B = 2\pi$ ，即有：

$$L_B = 2\pi / \Delta\beta_L = \lambda_0 / B$$

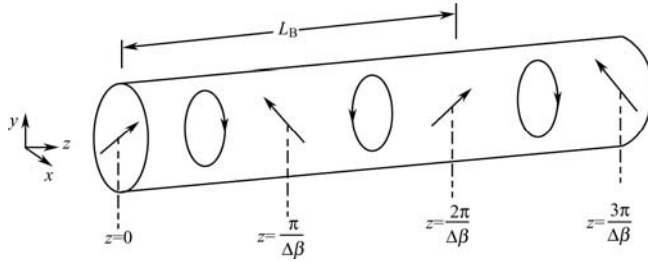


图 2-26 光纤双折射的偏振态在一个拍长上的演化

可见，双折射越严重，拍长越短。如光纤的拍长小于某种外界干扰的长度周期，就可抵御这种干扰而保持偏振状态。常用光纤的 B 在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 范围，有时以此为界，大于该值的称为高双折射光纤，低于该值的称为低双折射光纤。保偏光纤的 B 在 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 范围，为高双折射光纤。

消光比 η 和功率耦合系数 h ：如在光纤输入端激发 x 方向的线偏振模，其功率为 P_x ，由于耦合，在光纤的输出端出现了 y 方向的线偏振模，其功率为 P_y 。用消光比 η 和功率耦合系数 h 来表示这一对正交线偏振模的耦合作用。

$$\eta = \tan(hL) = P_x/P_y$$

式中， L 是光纤长度。这两参数说明光纤的保偏能力， η, h 越大光纤的保偏能力越强。

2. 线双折射的成因

引起光纤线双折射的原因很多，大致可归为两种。一种是由于光纤截面的非圆形，如光纤纤芯的椭圆化，另一种是由于非对称内部应力。前者叫几何双折射，后者叫应力双折射。下面对这两种双折射作简单介绍。

典型的几何线双折射是光纤纤芯椭圆变形形成的阶跃折射指数分布，其光纤截面如图 2-27 所示，长轴 $2a$ ，在 x 方向；短轴 $2b$ ，在 y 方向；椭圆度 $e=1-(b/a)^2$ 。由于纤芯的椭圆变形，基模 LP_{01}^x 和 LP_{01}^y 模的相位常数 $\beta_x \neq \beta_y$ ，线双折射率 $\Delta\beta_L = \beta_x - \beta_y$ 。

当椭圆度 $e \ll 1$ ，归一化频率 $V \approx 2.4$ [V 值按平均光纤芯径 $(a+b)/2$ 计算] 的情况下，双折射率为：

$$\Delta\beta_L \approx (e^2/2)(\Delta/2)^{3/2}$$

可见 $\Delta\beta_L$ 随纤芯的椭圆度和光纤相对折射指数差的增大而增大，如要得到低双折射光纤，对光纤纤芯的椭圆度要求很严格。

光纤中的应力双折射是由光纤受应力作用引起了弹性形变而造成的。光纤材料本身是各向同性介质，不同方向的电场分量所遇到的折射指数相同。当光纤受非对称应力时，将引起弹性变形，同时引起折射指数的变化，使材料变为各向异性，从而呈现出双折射。图 2-28 给出了两个应力双折射的例子。

图 2-28 (a) 表示光纤弯曲引起非对称应力双折射的情况，弯曲光纤外半径为 A ，弯曲曲率半径为 R 。图 2-28 (b) 表示光纤在 Y 方向受侧向压力引起非对称应力双折射。

利用这两种效应都可构成光纤元件如光纤型延迟器，它可用来进行光纤中的光偏振态的控制。

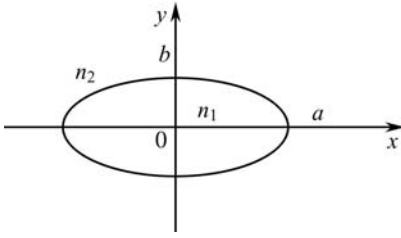


图 2-27 几何双折射

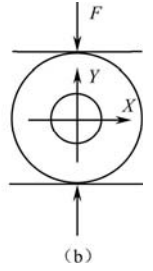
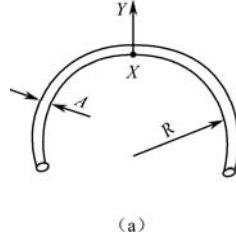


图 2-28 应力双折射

2.4.4 光纤的非线性效应

当今在带有掺铒光纤放大器的密集波分复用大容量、高速度的光纤通信系统中，光纤中传输的工作波长多、功率大，大的光功率可能引起信号与光纤的相互作用而产生各种非线性效应，如果不适当抑制，这些非线性效应会严重影响系统的性能和限制再生中继距离。

光纤的非线性可分为两类：非线性受激散射和折射率扰动。

1. 受激散射

非线性受激散射发生在光信号与光纤中的声波或系统振动相互作用的调制系统中，即光场把部分能量转移给非线性介质，受激拉曼散射和受激布里渊散射就属于此类。

1) 受激拉曼散射（SRS）

SRS（Stimulated Raman Scattering）是光纤介质中的分子振动对入射光（称为泵浦光）的相互作用，从而使入射光产生散射。设入射光频率为 ω_p ，光纤介质分子振动频率为 ω_v ，则散射光频率为 $\omega_s = \omega_p - \omega_v$ 和 $\omega_{as} = \omega_p + \omega_v$ ，这种现象叫受激拉曼散射。所产生的频率为 ω_s 的散射光叫斯托克斯波（Stokes），频率为 ω_{as} 散射光叫反斯托克斯波。对斯托克斯波可用物理概念来描述：一个入射光子消失，产生了一个频率下移光子（即 Stokes 波）和一个有适当能量和动量的光子，使能量和动量守恒。

对典型的单模光纤，受激拉曼散射产生的最低阈值泵浦光功率 P_R 可近似表示为：

$$P_R \approx \frac{16A_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}}g_R} \text{ (W)} \quad (2.47)$$

式中， A_{eff} 为纤芯有效面积，即 $A_{\text{eff}} \approx \pi W_0^2$ （ W_0 为模场半径）； L_{eff} 为光纤的有效相互作用长度； g_R 是拉曼增益系数。

由式（2.47）可见，阈值泵浦光功率与光纤的有效面积成正比，与光纤的有效长度成反比。若遇超低损耗的单模光纤，拉曼阈值会很低。在 $\lambda=1 \mu\text{m}$ 附近， $g_R=10^{-13} \text{ m/W}$ ， $L_{\text{eff}}=20 \text{ km}$ ， $A_{\text{eff}}=50 \mu\text{m}^2$ 时，预测的拉曼阈值约 400 mW。

受激拉曼散射的频移量在光频范围， ω_s 波和 ω_p 波传输方向一致。 ω_s 波和 ω_{as} 波传输方向相反，可采用光隔离器来消除相反方向传输的光功率。

2) 受激布里渊散射（SBS）

SBS（Stimulated Brillouin Scattering）是一种由光纤中的光信号和声波之间的相互作用所引起的非线性现象。

入射的光频为 ω_p 的泵浦光将部分能量转移给频率为 ω_s 的斯托克斯波，并发出频率为 Q 的声波：

$$Q = \omega_p - \omega_s$$

受激布里渊散射与受激拉曼散射在物理过程上类似，只是受激布里渊散射的频移量在声频范围， ω_s 波和 ω_p 波传输方向相反。在光纤中，SBS产生的最低阈值泵浦光功率 P_B 可近似表示为：

$$P_B \approx \frac{21A_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}}g_B} \quad (2.48)$$

由式(2.48)可见，在 $\lambda=1 \mu\text{m}$ 附近， $A_{\text{eff}}=50 \mu\text{m}^2$ ， $L_{\text{eff}}=20 \text{ km}$ ，布里渊增益系数 $g_B=5 \times 10^{-11} \text{ m/W}$ ，光纤受激布里渊散射阈值 $P_B \approx 1 \sim 15 \text{ mW}$ ，比 P_R 小得多。其精确值的大小取决于光源的谱线宽和光纤的特性，与信道数无关。SRS和SBS对光通信的不利影响是，光信号功率一旦达到拉曼或布里渊散射阈值，约65%能量将变成反向传输的斯托克斯波。这一方面消耗信号功率，另一方面反向斯托克斯波将使激光器工作不稳定。

2. 折射率扰动

在低光功率作用下，石英玻璃光纤的折射率是保持恒定的，但是用掺铒光纤放大器获得高光功率时，通过改变所传输信号的光强度，能够引起光纤折射率的变化，它们的关系如下式所示：

$$n = n_0 + n_2 P / A_{\text{eff}} = n_0 + n_2 |E|^2$$

式中， n_0 为线性折射率； n_2 为非线性折射率； P 为输入功率； A_{eff} 为纤芯有效面积； E 为光场强度。

折射率扰动引起三种非线性效应：自相位调制、交叉相位调制和四波混频。

1) 自相位调制 (SPM)

SPM (Self Phase Modulation) 是指传输过程中光脉冲自身相位变化，导致脉冲频谱展宽的现象。自相位调制与“自聚焦”有密切联系，如果十分严重，那么在密集波分复用系统中，光谱展宽会重叠进入邻近的信道。

光脉冲在光纤传输过程中相位变化为：

$$\phi = (n_0 + n_2 |E|^2) k_0 L = \phi_0 + \phi_{\text{NL}}$$

式中， $k_0 = 2\pi/\lambda$ ； L 是光纤长度； $\phi_0 = n_0 k_0 L$ 是相位变化的线性部分； $\phi_{\text{NL}} = n_2 k_0 L |E|^2$ 为自相位调制。

从原理上，自相位调制可用来实现调相；可在光纤中产生光孤子，实现光孤子通信。

2) 交叉相位调制 (CPM)

CPM (Cross Phase Modulation) 是一个脉冲对其他信道脉冲相位的作用。当两个或多个不同波长的光波在光纤的非线性作用下，将产生CPM，其产生机理与SPM相似。CPM与SPM不同的是SPM发生在单信道或多信道系统中，而CPM则仅出现在多信道系统中。

不同波长的脉冲之间互相作用，会造成光谱的展宽。在脉冲之间相互作用产生传输性能下降的过程中，波长色散起着双重作用。一方面色散降低以不同群速度传输的脉冲之间的相互作用，另一方面，波长色散暂时扩宽频谱功率。因此，CPM的作用是复杂的，但可

用非零色散位移光纤能有效地限制 CPM。

3) 四波混频

四波混频 FWM（Four Wave Mixing）是指由两个或三个波长的光波混合后产生的新光波，其原理如图 2-29 所示。在系统中，某一波长的入射光会改变光纤的折射率，从而在不同频率处发生相位调制，产生新的波长。新波长数量与原始波长数量是呈几何递增的，即： $N=N_0^2(N_0-1)/2$ （ N_0 为原始波长数）。而且四波混频与信道间隔关系密切，信道间隔越小，FWM 越严重。

FWM 对波分复用系统的影响为：一是将波长的部分能量转换为无用的新生波长，从而损耗光信号的功率；其二是新生波长可能与某信号波长相同或重叠，造成干扰。这种非线性效应会严重地损坏眼图并产生系统误码。各种光纤传输性能参数如表 2.8 所示。

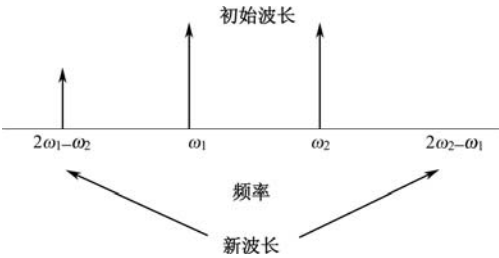


图 2-29 四波混频产生原理

表 2.8 各种光纤传输性能参数比较

光纤类型	性能参数							
	光波长：模场直径/（μm）	截止波长/（nm）	零色散波长/（nm）	工作波长/（nm）	衰减系数/（dB/km）		色散系数/[ps/（nm.km）]	
					1 310 nm	1 550 nm	1 310 nm	1 550 nm
G.651	纤芯直径： 50±3 或 62.5±3	数值孔径： 0.2~0.27 ±0.02	—	850	≤0.8 ≤1.0 ≤1.5	850 nm： ≤3.0 ≤3.5 ≤4.0	≤6	850 nm： ≤120
G.652	1 310 nm： 9	≤1 260	1 310	1 310	≤0.36	≤0.22	0	+18
G.653	1 310 nm： 8.3	≤1 270	1 550	1 550	≤0.45	≤0.25	-18	0
G.654	1 550 nm： 10.5	≤1 530	1 310	1 550	≤0.45	≤0.20	0	+18
G.655	1 310 nm： 8~11±0.7	≤1 480	非零色散波长 1 530~1 565	1 530~ 1 565	1550 nm： ≤0.25 1625 nm： ≤0.30		1530~1565 nm 0.1≤ D ≤10	
G.656	1550nm： 7~11±0.7	≤1450	非零色散波长 1 530~1 565	1530~ 1565	1530 nm： ≤0.35 1625 nm： ≤0.40		1530~1565 nm 3≤D≤14	
G.657	1 310 nm： 8.6~ 9.5±0.4	≤1260	非零色散波长 1 530~1 565	1310~ 1550	≤0.40	≤0.30	色散斜率： 1310~1324 nm 0.092（ps/nm².km）	
DFF	1 310 nm： 8 1 550 nm： 11	≤1 270	1 310 和 1 550	1 310~ 1 550	≤0.25	≤0.30	0	0
DCF	1 550 nm： 6	≤1 260	>1 550	1 550	—	≤1.00	—	-80~-150

习 题

1. 简单用射线理论描述阶跃型光纤的导光原理。
2. 写出 U, V, W 径向归一化常数表达式, 并简述其物理意义。
3. 什么是标量模 LP_{mn} , 简述标量模角标 m, n 的物理意义。
4. 简述单模光纤的模场直径、截止波长和双折射现象。
5. 简述使用过程中影响光纤损耗的因素。
6. 简述光纤色散的种类、产生的原因及其危害。并说明色散为什么会限制系统的通信容量。
7. 色散的程度用什么表示? 其单位是什么?
8. 已知渐变型光纤纤芯的折射率分布为:

$$n(r) = n(0) \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad 0 \leq r \leq a$$

求光纤的本地数值孔径 $NA(r)$ 。

9. 均匀光纤芯与包层的折射率分别为: $n_1=1.50$, $n_2=1.45$, 试计算:

- (1) 光纤的相对折射率差 Δ 。
- (2) 光纤的数值孔径 NA 。
- (3) 在 1 km 长的光纤上, 由子午线的光程差所引起的最大时延差 $\Delta\tau_{\max}$ 。
- (4) 若在 1 km 长的光纤上, 将 $\Delta\tau_{\max}$ 减小为 10 ns/km, n_2 应选什么值。

10. 已知阶跃光纤纤芯的折射率 $n_1=1.465$, 相对折射率差 $\Delta=0.01$, 纤芯半径 $a=25 \mu\text{m}$ 试

求:

- (1) $LP_{01}, LP_{02}, LP_{11}$ 和 LP_{12} 模的截止波长各为多少?
- (2) 若 $\lambda_0=1.3 \mu\text{m}$, 计算光纤的归一化频率 V 以及其中传输的模数量 N 各等于多少。

11. 阶跃光纤, 若 $n_1=1.50$, $\lambda_0=1.3 \mu\text{m}$, 试计算:

- (1) 若 $\Delta=0.25$, 为了保证单模传输, 其纤芯半径 a 应取多大?
- (2) 若取 $a=5 \mu\text{m}$, 为保证单模传输, Δ 应取多大?
- (3) 若将光纤的包层和涂敷层去掉, 求裸光纤的 NA 。

12. 单模光纤, 若 $n_1=1.500$, $n_2=1.495$, $\lambda_0=1.31 \mu\text{m}$, $a=5 \mu\text{m}$, 光纤的掺铒浓度 $W=3.5\%$,

试估算:

- (1) 光纤的模场直径 $2W_0$ 。
- (2) 理论截止波长 λ_{ct} 。
- (3) 紫外吸收损耗系数 α_{uv} 、红外吸收损耗系数 α_{ir} 和瑞利散射损耗系数 α_{R} 。
- (4) 临界弯曲半径 R_c 。

第 3 章 光纤通信基本器件

光器件是光纤通信系统与网络的重要组成部分，光器件可分为有源器件和无源器件两大类。光发射机采用的发光器件，如半导体激光器 LD、发光二极管 LED 等；光接收采用的光检测器件，如 PIN, APD 等；还有光放大器，如掺铒光纤放大器 EDFA、拉曼光纤放大器、半导体光放大器 SOA 等属于有源器件。光纤连接器、光纤分路耦合器、光开关、波分复用器、光滤波器、光衰减器、光隔离器、光环形器、光波长转换器、光偏振控制器等属于无源器件。本章介绍一些主要光器件的工作原理及特性。

3.1 光源器件

光源器件是光发射机的核心，它的作用是将电信号转换成光信号。光纤通信中常用的光源器件有半导体激光器 LD 和半导体发光二极管 LED 两种。这两种器件的发射波长与光纤的低损耗或低色散波长相一致，并能够在室温下连续工作、输出功率满足光纤通信系统的要求，它们的谱线宽度可以做得较窄，以减少光纤中色散的影响。此外，它们还具有体积小、重量轻、使用寿命长、与光纤耦合效率高、调制简便等一系列优点。

3.1.1 半导体激光器的结构及原理

半导体激光器是向半导体 PN 结注入电流，实现粒子数反转分布，产生受激辐射，再利用光学谐振腔的正反馈，实现光放大而产生激光振荡的。

1. 半导体激光器的工作原理

激光的产生与光源内部物质的原子结构和运动状态是密切相关的，原子中的电子不停地进行无规则运动，其能量只能取某些离散值，它们可以从较低的能级跃迁到较高的能级，也可以从较高的能级跃迁到较低的能级。就一个电子来看，它所具有的能量时大时小，不断地变化，但从大量电子的统计规律看，电子按能量大小的分布有一定的规律。一般而言，电子占据各个能级的几率是不等的，占据低能级的电子多，占据高能级的电子少。当原子中电子的能量最小时，整个原子的能量最低，这个原子处于稳态，称为基态；当原子处于比基态高的能级时，称为激发态。通常情况下，大部分原子处于基态，只有少数原子被激发到激发态，而且，能级越高，处于该能级上的原子数越少。在热平衡条件下，各能级上的原子数（或称集居数）服从费米（Fermi）统计分布规律，其数学表达式为：

$$f(E) = 1/[1 + e^{(E-E_f)/k_0T}] \quad (3.1)$$

式中， $f(E)$ 是能级为 E 被电子占据的概率，称为费米分布函数； $k_0=1.38 \times 10^{-23}$ J/k 为玻耳兹曼常数； T 为绝对温度，单位为开尔文（K）； E_f 为 Fermi 能级，它与物质的特性有关，它只

是反映电子在各个能级中分布情况的一个参量（是抽象的一个能级）。对于 E_f 的能级以下的所有能级，电子占据的可能性大于 1/2；对于 E_f 的能级以上的所有能级，电子占据的可能性小于 1/2。由式（3.1）可见电子占据能级可能性随着能级的增高，按指数减少。

1) 光的辐射和吸收

原子中电子可以通过与外界交换能量的方式发生能级跃迁，电子所处的能级代表电子所具有的能量，如果电子获得能量，表现在电子从低能级跃迁到高能级，此时，电子所具有的能量比跃迁前高。

爱因斯坦于 1917 年根据辐射与原子相互作用的量子论提出：光与物质相互作用时，将发生自发辐射、受激辐射和受激吸收三种物理过程，这三种物理过程表现了光与物质相互作用时，光可以被物质吸收，也可以从物质中发射出来。受激辐射过程是激光器的物理基础。

（1）自发辐射效应，如图 3-1（a）所示。在没有外界影响的情况下，当处在高能级 E_2 粒子自发地向低能级 E_1 跃迁而发射出一个频率为 f ，能量为 ε 的光子，这种发光过程称为自发辐射。发射出的光子的能量为两级的能量之差，即：

释放光子能量为：
$$\varepsilon = E_2 - E_1 = hf$$

发射光子的频率为：
$$f = (E_2 - E_1) / h$$

式中， $h=6.628 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，叫普朗克常数； f 为发射光子的频率。自发辐射的特点是高能级的粒子都是独立自发跃迁，其辐射光子之间不相干。自发辐射的一个个光子，仅仅是光子的能量相等，各列波的相位和偏振方向都不相同，所以可以向四面八方传播为非相干光。

（2）受激吸收效应，如图 3-1（b）所示。原处于低能级 E_1 的粒子当受到外来的频率为 $f_{\text{外}}=(E_2-E_1)/h$ 的光子照射时，会吸收光子的能量从低能级 E_1 向高能级 E_2 跃迁，这个过程叫受激吸收。受激吸收的必须条件是在外来光子的激励下，且每个外来光子能量 $hf \geq E_2 - E_1$ 。

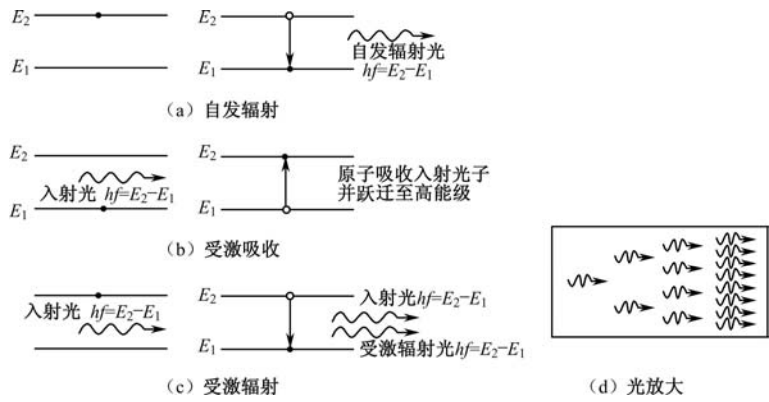


图 3-1 能级和电子的跃迁

（3）受激辐射效应，如图 3-1（c）所示。处于高能 E_2 的粒子受到外来光子的激发（感应），发射一个与感应光子一模一样的全同光子，即频率、相位、偏振方向和传播方向相同即受激辐射发出光为相干光。受激辐射条件是每个外来光子的能量 $hf \geq E_2 - E_1$ ，其特点是外来光子与感应光子为全同光子。在受激辐射中，一个外来光子作用，可以得到两个全同

光子，如果这两个光子再次引起粒子产生受激辐射，就可得到四个全同光子，如此进行下去，将形成“雪崩”反应，得到大量的全同光子，这种现象称为光放大，如图 3-1（d）所示。光的受激辐射是半导体激光器产生激光的条件之一。

（4）粒子数反转分布。在通常情况下，即热平衡条件下，粒子的正常能级分布总是低能级上的粒子数大于高能级粒子数。总效果是光受激吸收比受激辐射占优势，因此媒质为吸收媒质。若要获得光的放大，必须设法使受激辐射占优势，使粒子的能态分布反常，即处于高能级上的粒子数多于低能级粒子数，通常把这种分布叫做粒子数反转分布，也叫光放大状态。

2) 激光产生的条件

激光器是光自激振荡器，激光是由以受激辐射为基础的物质内部原子内能的变化引起的。要想产生激光，必须具备光放大（粒子数反转分布）、频率选择及正反馈、要满足一定阈值和相位特性这三个基本条件。其中光放大由激光工作物质外加泵浦源使物质产生粒子数反转分布来完成；频率选择和正反馈由光学谐振腔来实现。

（1）光放大工作物质。激光工作物质应具有确定能级系统，可在需要的光波范围内辐射光子，它可以是固体、气体或液体，也可以是半导体材料。泵浦源是能够使激光工作物质处于粒子反转分布的激励源，它可以是另一个光源、电源或化学能源。

（2）频率选择及正反馈。光学谐振腔是能引起振荡和正反馈的系统，其对光波具有频率选择作用。光学谐振腔一般利用两个相互平行的平面反射镜 M_1 和 M_2 组成，而把激活物质放在两个反射镜之间，其中 M_1 的反射率为 100%， M_2 的反射率为 90%左右，以便从 M_2 获得激光输出。图 3-2 给出了一个简单的激光器结构原理图。

在激光器中，首先由泵浦源激励激光工作物质，产生粒子数集聚反转分布。同时，由于自发辐射也将产生自发辐射光子，这些光子辐射的方向是任意的，它们之中凡是沿着与谐振腔轴线夹角较大的方向传播的光子，将很快逸出腔外，只有那些沿着与谐振腔轴线夹角较小的方向传播的光子流，才有可能在腔内沿轴线方向来回反射传播，在腔内的激活物质中来回穿行，这样，受激辐射产生连锁反应，像雪崩般的加剧，当光功率达到一定程度时，在部分反射镜 M_2 的一侧输出一个高功率的平行光子流，在这一过程中由于受激辐射跃迁而产生大量的全同光子，这就是激光。

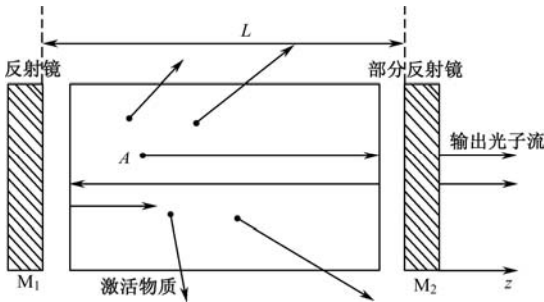


图 3-2 激光器结构原理图

（3）阈值条件和相位特性。激活物质和光学谐振腔只是为激光产生提供了必要的条件，要产生激光振荡，还必须满足一定的阈值条件和相位条件。如图 3-2 所示，设两个反射镜的反射率为 r_1 和 r_2 ，则腔内光功率随距离的变化可表示为：

$$P(z)=P(0) \exp[g_0-\alpha_i]z \quad (3.2)$$

式中, $P(0)$ 为 $z=0$ 处的光功率, g_0 , α_i 分别为激活物质的增益系数和损耗系数。设光束在腔内经历一个来回, 两次通过增益介质后的光功率为:

$$P(z)=P(2L)=P(0)r_1r_2\exp[(g_0-\alpha_i)2L]$$

要想产生振荡必须满足 $P(2L) \geq P(0)$, 即:

$$r_1r_2\exp[(g_0-\alpha_i)2L] \geq 1 \quad (3.3)$$

因此有:

$$g_0 \geq \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{r_1r_2} = \alpha \quad (3.4)$$

式 (3.4) 即为产生激光的阈值条件, 式中第一项是增益物质内部损耗, 第二项是通过两个反射镜的传输损耗, 当增益系数 g_0 大于 α 时, 将迅速出现激光输出。

要产生激光振荡, 除了要满足阈值条件以外, 还要满足相位平衡 (谐振) 条件, 即激光器必须工作在谐振腔的工作模式上。如图 3-2 所示平行平面谐振腔, 为了能在腔内形成稳定振荡, 要求光波能因干涉而形成正反馈使光波能量加强。条件是波从某一点出发, 经腔内往返一周再回到原来位置时, 应与初始出发波同相, 即相差为 2π 的整数倍。可以表示为:

$$\Delta\phi=2\pi q=k \times 2L=(2\pi/\lambda_q) \times 2L \quad (3.5)$$

$$L=(\lambda_q/2) \times q \quad (3.6)$$

式中, k 为介质中相位常数, $k=2\pi/\lambda_q$, $q=1, 2, 3, \dots$; $\lambda_q=2L/q$ 为与 q 值对应的波导波长; L 为腔的几何长度。上式为激光器的相位平衡条件, 通常又称为光腔的驻波条件, 当满足该条件时, 腔内形成驻波。

$$\text{谐振波长: } \lambda_{0q}=n \times \lambda_q=2nL/q \quad (3.7)$$

$$\text{谐振频率: } f_{0q}=c/\lambda_{0q}=cq/2nL \quad (3.8)$$

式中, n 为整个光腔内充满均匀工作物质的折射率。 $L \gg \lambda_q$, 因此, q 值约为 $10^4 \sim 10^6$ 数量级。例如, 某半导体激光器 $L=400 \mu\text{m}$, $n=3.4$, $\lambda_{0q}=1.3 \mu\text{m}$, 则由式 (3.7) 可求出 $q=2092$, 这就是说腔内的纵模很多。

所谓“纵模”是指光场沿轴 z 向变化模式。通常由不同的 q 值, 对应不同谐振频率, 对应不同光场的纵向分布, 对应不同驻波图案。 q 值代表不同的纵向模式, 称为激光器的纵模, 如图 3-3 所示。例如 $q=8$, 腔长 $L=(\lambda_q/2) \times 8$, 有 8 个半个波长, 其谐振频率 $f_{08}=c \times 8/2nL$ 。

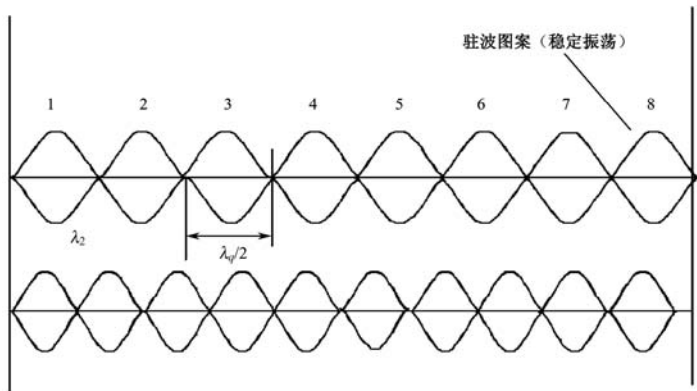


图 3-3 激光振荡的驻波图案

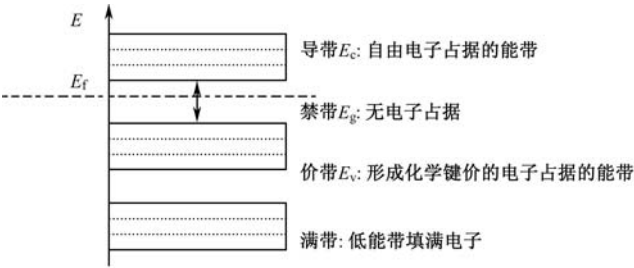
纵模间隔是指相邻的两个纵模的谐振频率间隔 Δf_{0q} ，由式（3.8）得：

$$\Delta f_{0q}=f_{0q+1}-f_{0q}=c(q+1)/2nL-cq/2nL=c/2nL$$

可见 Δf_{0q} 与腔长 L 有关， L 越长， Δf_{0q} 越小，与 q 的取值无关。典型的 $L=200\sim 400\text{ }\mu\text{m}$ ， $n=3.4$ ，则 Δf_{0q} 在 $1.1\times 10^{11}\sim 2.2\times 10^{11}\text{ Hz}$ 之间。

3) 半导体的能带结构及电致发光

半导体材料大多是共价晶体，晶体的最大特点是其大量原子呈有规则地、周期性排列于空间，构成一定形式的晶格，如GaAs晶体就是有大量Ga（镓）和As（砷）原子按一定周期排列而成。当原子间相互接近形成晶体时，不同原子的内外各电子壳层将发生交叠，电子不再完全被约束在某一个原子上，它可以由一个原子转移到相邻原子上去，电子可以在整个晶格中运动，称为电子的共有化运动。其结果使原子中的每一个能级分裂成若干相邻的能级，彼此又靠得很近组成的具有一定宽度的能带，如图3-4所示。形成化学键价的电子占据的能带称为价带，能量在价带以上而且带内基本无电子占据，但在一定条件下又可被自由电子占据的能带称为导带，导带和价带之间的空隙称为禁带。禁带不能被电子占据，其宽度 $E_g=E_c-E_v$ 。



注： E_v 是价带顶部的能量， E_c 是导带底部能量， E_f 是费米能级的能量

图 3-4 晶体的能带图

P型和N型半导体构成的PN结的能带及电子是如何分布的呢？半导体是由大量原子有次序地周期性排列构成的共价晶体。半导体的能带和电子分布如图3-5所示。一般状态下，本征半导体的电子与空穴成对出现。费米能级 E_f 位于禁带中央，见图3-5（a）。在本征半导体中掺入施主杂质，称为N型半导体。在N型半导体中， E_f 增大，导带的电子增多，价带的空穴相对减少，见图3-5（b）。在本征半导体中掺入受主杂质，称为P型半导体。在P型半导体中， E_f 减小，导带的电子减小，价带的空穴相对增多，见图3-5（c）。

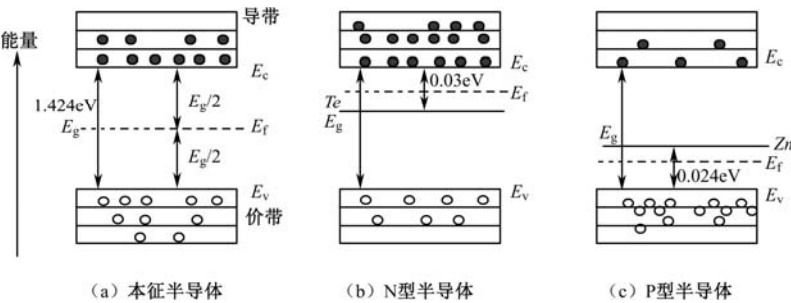


图 3-5 半导体的能带和电子分布

在 P 型和 N 型半导体组成的 PN 交界面上，由于存在多数载流子（电子或空穴）的梯度，因而产生扩散运动，形成内部电场，见图 3-6（a）。内部电场产生与扩散相反方向的漂移运动，直到 P 区和 N 区的 E_f 相同，两种运动处于平衡状态为止，结果能带发生倾斜，见图 3-6（b）。这时在 PN 结上施加正向电压，产生与内部电场相反方向的外加电场，结果能带倾斜减小，扩散增强。N 区电子及 P 区的空穴源源不断地流向 PN 结区形成一个特殊的增益区又称为有源区。在那里增益区的导带主要是电子，价带主要是空穴，结果获得粒子数反转分布，见图 3-6（c）。当电子与空穴辐射复合时，导带的电子从高能带跃迁到低能带价带，跃迁所释放的能量则产生光子，这就是产生光发射的物理机理。PN 结在正向偏压下由电子注入产生自发辐射的现象称为电致发光。

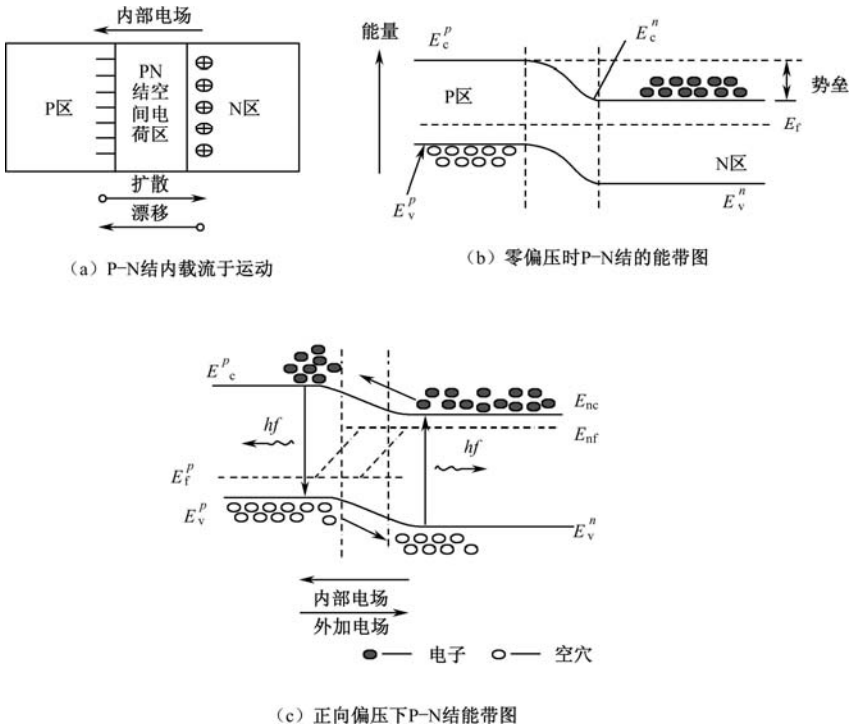


图 3-6 PN 结的能带和电子分布

2. 半导体激光器的基本结构

法布里·珀罗 (F-P) 型 LD 是最常见的激光器，其基本结构是由一个薄有源层（厚度约 $0.05 \sim 0.1 \mu\text{m}$ ）、一个 P 型层和一个 N 型层构成，如图 3-7 所示。有源层夹在 P 型限制和 N 型限制层中间，它可以是 P 型，也可以是 N 型。当给 LD 施加正向偏置时，电子从 N 型限制层，空穴从 P 型限制层注入电子和空穴到有源层。由于异质结带隙之差使注入到有源层中电子和空穴不能扩散而被限制在薄的有源层中，因此容易实现粒子数反转，即使有很小电流流过，薄有源层也会有很高浓度。当有源层中反转分布的电子从导带跃迁到价带，与空穴复合释放出光子，这些光子在由两个解理面组成的粒子数反转分布谐振腔中往返传播，从而获得光增益，当光增益大于损耗时，便有激光向外射出。

“异质结”是指具有不同折射率和不同禁带宽度的两种半导体材料构成的 PN 结。异质结结构的激光器，可以有效地限制光波和载流子，从而降低激光器阈值电流，提高激光器输出功率和效率。应用最广泛的双异质结激光器（DH-LD）结构如图 3-8 所示，其特点是光波导效应明显，损耗小，阈值电流 I_{th} 低，有源区宽度窄，发光强度更加集中。

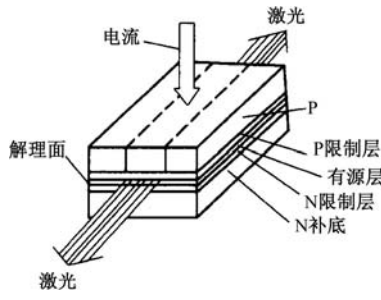


图 3-7 DH 激光二极管芯示意图

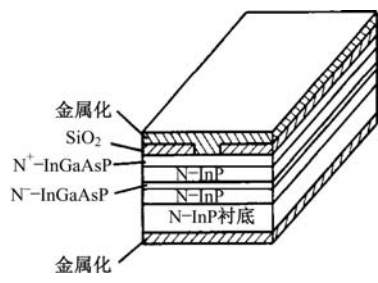


图 3-8 DH-LD 结构

除 DH-LD 外，还有增益导引条形半导体激光器，其机理是条形区域依靠增益形成微小折射率差，使光场受到限制，形成增益波导，其典型有源区的宽度为 $1.0\sim1.5\text{ }\mu\text{m}$ ，阈值电流 $I_{th}<50\text{ mA}$ 。隐埋条形半导体激光器近几年发展迅速。其特点是有源区的限制层材料是 GaAlAs，其禁带宽度 (E_g) 较宽， n 低的，使有源区形成导波效应明显，对光波和载流子进行限制从而使粒子数反转分布浓度升高， I_{th} 降低。 I_{th} 为 $10\sim30\text{ mA}$ ，输出光功率 $P_0=30\text{ mW}$ ，有源区宽度仅 $1\sim2\text{ }\mu\text{m}$ ，厚度为 $0.1\sim0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。

量子阱半导体激光器，其结构与普通的 DH-LD 的结构基本相同，主要是有源层进一步减小， I_{th} 降低（约 0.55 mA ）。其特点是增益高，动态单纵模特性好，温度特性好，横模控制能力强，适用于高速率，大容量的光纤通信系统。

为什么半导体 GaAs 材料在电子能级跃迁时，电子—孔穴的复合就能产生光发射与光吸收呢？这是因为半导体材料能带结构分布存在着直接带隙和间接带隙，如图 3-9 所示。由于半导体内光子与电子之间的相互作用所导致的电子的跃迁，除需要满足能量守恒条件之外，还必须满足动量守恒条件。自由电子运动的动量状态 P ，由电子的量子力学波矢量 k 决定，即：

$$P=\hbar k \tag{3-9}$$

其中， \hbar 为普朗克常数。

光子的动量与电子的动量相比可以忽略，因此，电子的跃迁前后应具有相同的动量，即有相同的波矢量 k 。如图 3-9 所示，在直接带隙材料中，导带中的最低能量状态与价带中的最高能量状态具有相同的波矢量，即位于动量空间中的同一点上。因此光子与电子之间相互满足动量守恒条件，电子—空穴跃迁复合就能发射光。而在间接带隙材料中，不具有动量守恒条件，因此不适合制作光源。常用半导体材料如硅（Si）、锗（Ge）等属于间接带隙材料，不能用于制作光源，主要用于集成电路和光检测器的制作。砷化镓（GaAs）、磷化铟（InP）砷磷化铟镓（InGaAsP）等属于直接带隙材料，主要用于集成电路、发光二极管、激光器、光检测器的制作。

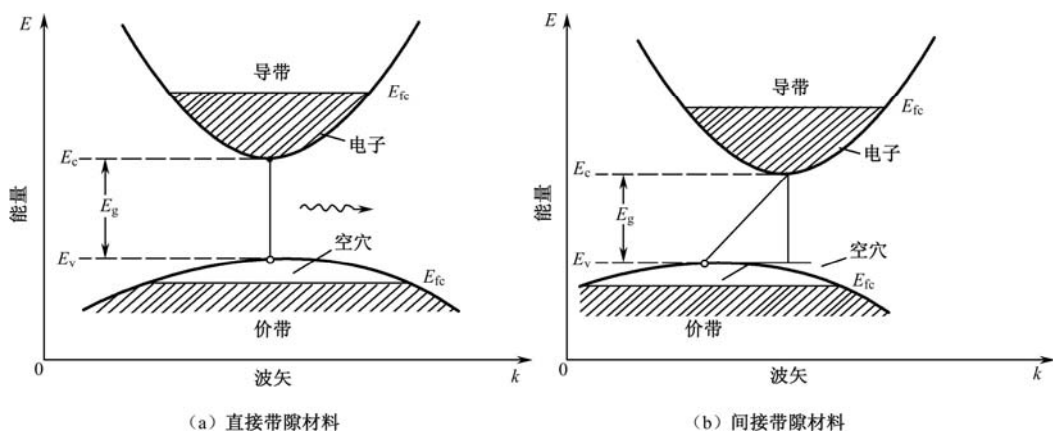


图 3-9 材料能带、波矢量关系示意图

3.1.2 分布反馈式和可调谐式半导体激光器

前面介绍的半导体激光器异质结 LD、隐埋条形 LD、量子阱 LD 等都属 F-P 腔激光器。在长距离、大容量光纤通信中，需要线谱宽度窄、在动态（即高速调制）下仍能在单纵模工作的激光器——动态单纵模半导体激光器作为光源，以消除光纤色散等带来的影响。

1. 分布反馈式半导体激光器

分布反馈式半导体激光器是一种动态单纵模激光器，其结构与普通 F-P 激光器不同，它没有集总反射的谐振腔反射镜，它的反射机构是由有源区波导上纵向等间隔（布拉格，Bragg）光栅提供工作。这种新型半导体激光器又可分为分布反馈激光器（Distributed feedback, DFB-LD）和分布布拉格反射激光器（Distributed Bragg Reflector, DBR-LD）。

下面先介绍 DFB-LD 的结构及原理。DFB-LD 的结构如图 3-10 所示，在有源区介质表面使用光刻法形成周期性的波纹形状，波纹周期为 Λ ，约有上千个 Bragg 反射镜（点），按纵向分布于全长上。只要对激光器注入正向电流时，有源区造成足够的粒子数反转，介质就具有增益。如果波纹周期 Λ 满足式 (3.10) 相位条件，则有源区内电子—空穴复合，在两端就可得到激光输出。这种 Bragg 条件为：

$$\Lambda = m \times \lambda_m / 2 = m \times \lambda_0 / 2n \quad (3.10)$$

式中， Λ 为光栅周期； λ_m 为有源介质中光波长； λ_0 为真空波长； n 是有源层折射率； m 为整数，是光栅引起的布拉格衍射级次。当 $m=1$ 时，提供的反馈最强，即前向和后向波之间耦合最强。对于波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的激光器，可以计算出 $m=1$ ， $n=3.4$ 时， $\Lambda=0.23 \mu\text{m}$ 。

与 F-P 腔激光器相比，DFB 激光器具有下述优点：

(1) 单纵模特性好。DFB 激光器的发射波长主要由光栅周期 Λ 决定。在每一个周期 Λ 内形成一个微谐振腔。由于 Λ 的长度很小，故模式间隔比 F-P 腔激光器大得多，较容易实现单纵模工作，边模抑制比可达 35 dB 以上。

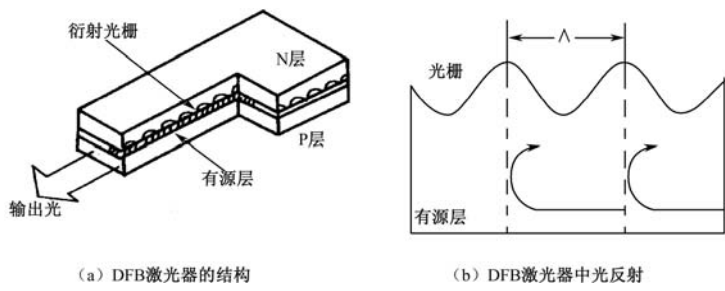


图 3-10 DFB 激光器的结构示意图

(2) 线宽窄。在 DFB 激光器中，布拉格反射相当于多级调谐，使谐振波长的选择性大为提高。

(3) 温度特性好。由于光栅的引入有助于输出光波波长的锁定，故 DFB 激光器的温度特性好，其温度漂移约为 $0.9 \text{ A}/^\circ\text{C}$ 。

(4) 调制特性好。DFB 激光器在高速调制下也能保持单纵模振荡，在 GHz 量级直接调制下，边模抑制比可以大于 30 dB，这使得 DFB 激光器成为长波长高速光纤通信系统和光纤有线电视（CATV）传输系统中的理想光源。

尽管 DFB-LD 有很多优点，但并非尽善尽美，DBR-LD 恰好对 DFB-LD 不足有所改进。DBR 激光器的结构如图 3-11 所示。它将周期性刻蚀波纹沟槽放在具有放大作用的有源区外侧的无源波导上，这两个无源的周期波纹波导充当 Bragg 反射镜作用，在自发辐射光谱中，只有在 Bragg 频率附近的光波才能满足振荡条件得以提供有效的反馈。由于有源区的增益特性，从而发射出激光。

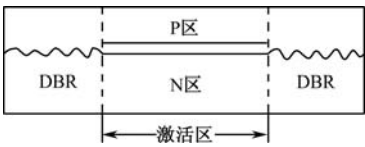


图 3-11 DBR 激光器的结构

在未来的通信和 CATV 共纤传输的波分复用（WDM）系统中，DBR-LD 将备受青睐。DBR 激光器的工作特性与 DFB 激光器相似，但由于在有源区和 DBR 区之间存在耦合损耗，故其阈值电流比 DFB 激光器高。

2. 可调谐式半导体激光器

DFB 和 DBR 激光器显然具有很高的边模抑制，因而能实现单纵模输出，但这类激光器的发光波长仍是固定的不能调制。对于相干光通信和 DWDM 系统则需要若干不同波长的 LD 作光源，这样就需要制作较宽波长范围内其波长任意可调的 LD，而耦合腔激光器既可以提供大的纵模选择性，又具有波长可调性。

1) C³ 耦合腔结构波长可调激光器（Cleaved-Coupled Cavity laser）

如图 3-12 所示，C³ 激光器是耦合腔的单片集成化设计。它将传统的多纵模半导体激光器从中间切开，一段长 L ，另一段长 D ，分别加以驱动电流。中间为一个窄的空气间隙，宽度约为 $1 \text{ }\mu\text{m}$ 。切开解理面的反射率约为 30%，可以使器件的两个部分之间有足够的耦合。

改变某一腔体注入电流， C^3 激光器可以实现约 20 nm 范围的波长调谐，这种调谐不是连续的，因为激光器至少跳变一个模式间隔，大约 2 nm，其主要特性为：

$$\text{腔长} = L + a + D = (1/2)q\lambda_q$$

波长可调谐：一是通过改变外腔特性，二是通过选主模改变外腔的光学长度来移动外腔 F-P 模从而实现调谐。

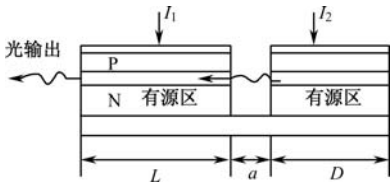


图 3-12 C^3 激光器

2) 光栅外腔结构波长可调激光器 (ECL)

利用光栅衍射对光波进行选择，类似于牛顿棱镜。图 3-13 为光栅外腔半导体 (ECL) 激光器结构。通过调节光栅的倾角，可以实现单纵模调谐，调谐范围可以达 50 nm 以上。AR 激光器芯片一端要镀增透膜，以增强耦合效果。在相干光通信以及 WDM 光通信系统中，需要采用可调谐光源作为本振光源。

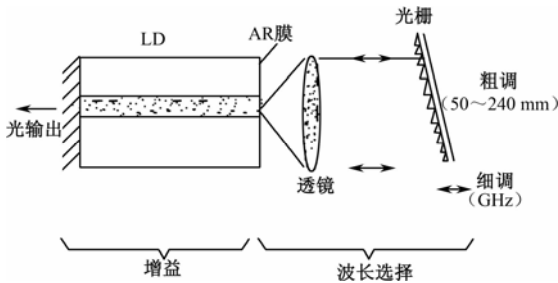


图 3-13 光栅外腔半导体激光器

LD 在使用时都必须有散热结构和恒温控制以及与光纤耦合防反射的隔离器等。目前商用激光器制成 LD 组件，其结构和外形如图 3-14 和图 3-15 所示。激光器组件由 LD、光电二极管 PIN、冷却器 TEC、隔离器、热敏电阻 R_T 和单模光纤组成。

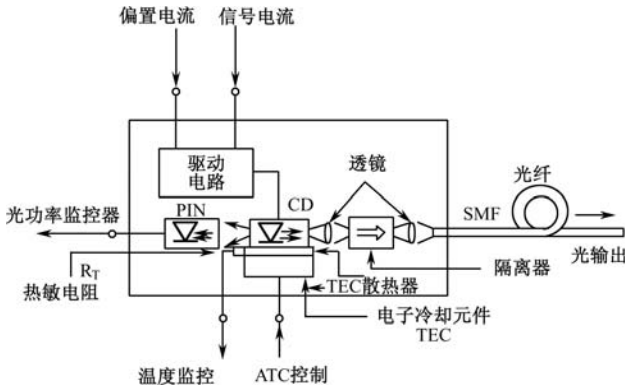


图 3-14 激光器组件图

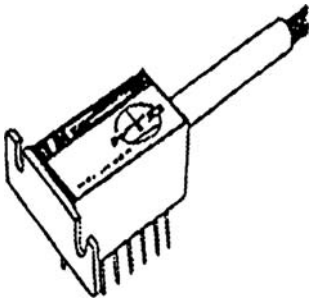


图 3-15 激光器组件外形

3.1.3 半导体激光器的主要特性

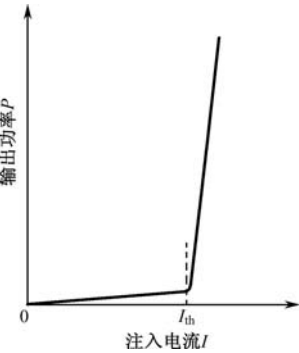


图 3-16 激光器 P - I 曲线

1. 阈值稳态特性（ P - I 曲线）

半导体激光器的光功率-电流特性曲线如图 3-16 所示，图中 I_{th} 是阈值电流。当激励电流小于阈值电流时，其输出光功率很小，功率随电流增加得很缓慢，这时的半导体激光器工作在自发辐射状态，它发出的不是激光而是荧光，这一区域叫做荧光区。当激励电流超过阈值电流时，光功率随电流的增大而急剧上升，这时激光器发出的才是激光。在这一区域内， P - I 特性曲线呈线性。由于 I_{th} 是 P - I 特性曲线的一个转折点，因而可由 P - I 特性曲线决定 I_{th} 值。

2. 温度特性

半导体激光器是一个对温度很敏感的器件，它的输出功率随温度变化很大，图 3-17 给出了一个 $1.3\mu\text{m}$ 的 InGaAsP-DH 半导体激光器在 $10\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的 P - I 特性曲线。在室温下，器件的阈值达到 20 mA 。当注入电流为 100 mA 时，器件的输出光功率可以达到 10 mW 。在高温时，激光器的特性发生劣化，随着温度的升高，阈值电流也会升高，阈值电流与温度的关系可表示为：

$$I_{th}(T) = I_0 \exp\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

式中， T 为器件结区的绝对温度； T_0 为激光器材料的特征温度， T_0 越大，器件的温度特性越好； I_0 为常数，它与激光器所使用的材料与结构有关，它表征了半导体激光器的阈值电流对温度的敏感性。

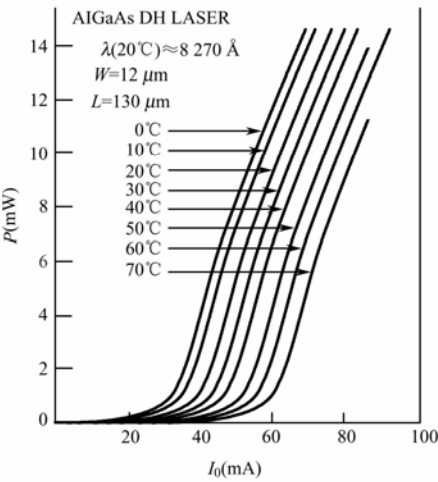


图 3-17 P - I 曲线随温度的变化

例如,短波长 GaAs/GaAlAs-LD 的 $T_0=100\sim 150\text{K}$,长波长 InGaAsP/InP-LD 的 $T_0=50\sim 70\text{K}$,这表明 InGaAsP/InP-LD 对温度更敏感,因此在使用时,必须对温度进行控制。

若 LD 在 T_1 绝对温度时所对应的阈值电流为 $I_{\text{th}1}$,在 T_2 绝对温度时所对应的阈值电流为 $I_{\text{th}2}$,则两者关系为:

$$I_{\text{th}2}=I_{\text{th}1}\exp[(T_2-T_1)/T_0]$$

3. 转换效率

半导体激光器是把电功率直接转换成光功率的器件。其电光之间转换效率用外量子效率 η_D 表示:

$$\eta_D = \frac{(P_{\text{ex}} - P_{\text{th}})/hf}{(I - I_{\text{th}})/e_0} = \frac{\Delta P}{\Delta I} \frac{e_0}{hf}$$

式中 P_{th} 和 I_{th} 分别是对应阈值; P_{ex} 和 I 分别为激光器的输出光功率和驱动电流; hf 和 e_0 分别为光子能量和电子电荷。由此得到:

$$P_{\text{ex}} = P_{\text{th}} + \frac{\eta_D hf}{e_0} (I - I_{\text{th}})$$

η_D 的几何意义是 P - I 曲线线性部分的斜率,它不随注入电流变化。若 $P_{\text{ex}} \gg P_{\text{th}}$, 则有:

$$\eta_D \approx \frac{P_{\text{ex}}/hf}{(I - I_{\text{th}})/e_0} = \frac{P_{\text{ex}} \times e_0}{(I - I_{\text{th}})hf}$$

4. 发光波长和光谱特性

半导体激光器的发光波长取决于导带的电子跃迁到价带时所释放的能量,这个能量近似等于材料的禁带宽 E_g , 单位为电子伏特 eV, 半导体激光器的发光波长 λ , 单位为 μm , 可通过下式求得:

$$hf=E_g$$

式中, $f=c/\lambda$, f 和 λ 分别为发射光的频率和波长, 代入上式得:

$$\lambda=ch/E_g=1.24/E_g \quad (3.11)$$

不同的半导体材料有不同的禁带宽度, 对于 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, 其禁带宽度为:

$$E_g=1.424+1.247x \quad 0 \leq x \leq 0.45 \quad (\text{用于 } 0.85 \mu\text{m})$$

有源区 GaAs/GaAlAs 调节 Al 含量改变 x , 从而改变发射波长, 范围为 $0.75\sim 0.92 \mu\text{m}$ 。对长波长 LD, 常用材料 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 带隙与 y 的关系为:

$$E_g=1.35-0.72y+0.12y^2 \quad 0 \leq y \leq 1; x/y=0.45$$

选择合适的 x, y , 可以使得 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 的光波长为 $1.3\sim 1.6 \mu\text{m}$ 。

- 有源区 InGaAsP/InP 调 InGaAsP 可改变波长, 范围为 $1.0\sim 1.7 \mu\text{m}$
- 有源区 GaInAs/ GaInP 调 InGaAs 可改变波长, 范围为 $1.06\sim 1.7 \mu\text{m}$
- 有源区 GaAsSb/GaAlAsb 调 GaAsSb 改变波长, 范围为 $0.87\sim 1.68 \mu\text{m}$

光谱特性如图 3-18 所示, 它是衡量器件发光单色性的一个物理量。造成 LD 光谱非单色性的原因主要有两个: 一是由于 LD 的粒子反转分布不是产生在两个分离原子能级之间, 而是在两条能带之间 (价带和导带), 由于能带中有许多分离的能级被电子填充, 因此各电子跃迁后能级差 ΔE 各不相同, 产生的激光谱线较宽。二是由于光学谐振腔长度 L 较大, 满

足谐振条件的频率很多。光谱特性常用下列参数描述：

1) 光谱辐射宽度 $\Delta\lambda$

$\Delta\lambda$ 的定义是最大峰值波长功率下降 50%的所有波长，称为光谱辐射宽度。

2) 光谱线宽 $\Delta\lambda_L$

$\Delta\lambda_L$ 的定义是在一个纵模中光谱辐射功率为其一半的谱线两点间的波长间隔。

3) 边模抑制比 MSR

MSR 定义为：主模功率 P_m 与最强边模功率 P_s 之比，它是 LD 频谱纯度的一种量度，如图 3-19 所示，写成公式为：

$$MSR = 10\lg \frac{P_m}{P_s}$$

4) 最大-20 dB 宽度

主纵模下降 20 dB 处的光谱线宽 $\Delta\lambda_L=\lambda_2-\lambda_1$ ，如图 3-19 所示。

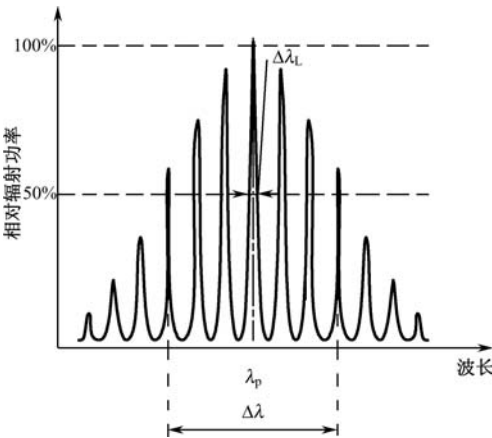


图 3-18 半导体激光器的光谱

5. 电光延迟 t_d 和张弛振荡现象

半导体激光器在高速脉冲调制下，输出光脉冲瞬态响应波形如图 3-20 所示。输出光脉冲和注入电流脉冲之间存在一个初始延迟时间，称为电光延迟时间 t_d ，其数量级一般为 ns 级。 t_d 可用“速率”方程求得：

$$t_d = \tau_{sp} \ln [J_p / (J_p + J_b - J_{th})] \quad \text{或} \quad t_d = \tau_{sp} \ln [I_p / (I_p + I_b - I_{th})]$$

式中， J_p 脉冲电流密度的幅度； I_p 是脉冲电流的幅度； I_b 是直流偏值； I_{th} 是阈值电流； τ_{sp} 是自发辐射寿命。可以看出，当 $I_b \rightarrow I_{th}$ 时，则 $t_d \rightarrow 0$ ，一般情况下 t_d 在 0.5~2.5 ns 范围内。

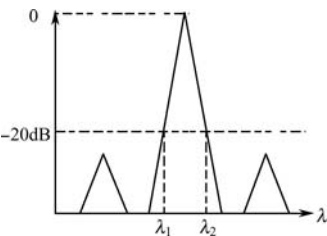


图 3-19 单纵横激光器光谱图

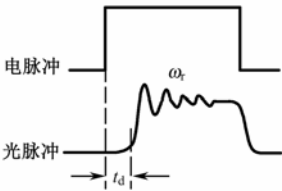


图 3-20 光脉冲瞬态响应波形图

电光延迟要产生码形效应如图 3-21 所示, 当电光延迟 t_d 与数字调制信号周期 $T/2$ 为相同数量级时, 会使“0”码后的“1”码光脉冲变窄, 幅度减小; 若两个脉冲连续为“1”时, 第二脉冲的电子密度高于第一脉冲到来之前的值, 于是第二光脉冲延迟时间减少, 输出幅度和宽度增加。这种现象称为码形效应。其特点是: 脉冲序列中较长的连“0”以后, 出现的“1”码光脉冲的幅度明显下降, 连“0”数越长, 这种现象越突出; 调制速率越高, 码形效应越明显。

当电流脉冲注入激光器后, 输出光脉冲会出现幅度逐渐衰减的振荡, 称为张弛振荡, 其振荡频率 f_l 一般为 $0.5 \sim 2 \text{ GHz}$, 这些特性与激光器有源区的电子自发复合寿命和谐振腔内光子寿命以及注入电流初始偏差量有关。

张弛振荡和电光延迟的后果是限制调制频率。当最高调制频率接近张弛振荡频率时, 波形失真严重, 会使光接收机在抽样判决时增加误码率。因此实际使用的最高调制频率应低于张弛振荡频率。

6. 自脉动现象 (等幅振荡)

某些激光器在脉冲调制甚至直流驱动下, 当注入电流达到某个范围时, 输出光脉冲出现持续等幅的高频振荡, 这种现象称为自脉动现象, 如图 3-22 所示。自脉动频率可达 2 GHz , 严重影响 LD 的高速调制特性, 自脉动现象是激光器内部不均匀增益或不均匀吸收产生的, 往往和 LD 的 $P-I$ 曲线的非线性有关, 自脉动发生的区域和 $P-I$ 曲线扭折区域相对应。因此, 在选择激光器时应特别注意。

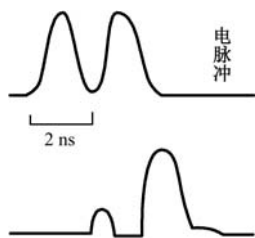


图 3-21 码形效应图

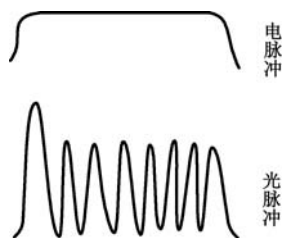


图 3-22 激光器的自脉动现象

3.1.4 半导体发光二极管 (LED)

作为光纤通信中常用光源的发光二极管, 在工作原理上与半导体激光器的根本区别是: 发光二极管是利用注入有源区的载流子自发辐射而发出光, 其谱线较宽 ($30 \sim 60 \text{ nm}$), 辐射角度也较大, 在低速率的数字通信和较窄带宽模拟通信系统使用为最佳光源, 而用于器件的材料及异质结构没有很大差别。二者在结构上的主要差别是: 发光二极管没有光学谐振腔, 形不成激光, 它的发光仅限于自发辐射, 发出的是荧光, 是非相干光。

LED 主要有五类结构, 但在光纤通信中广泛应用的有两种: 一种是发光面与 PN 结平面平行, 称为表面发光二极管 (SLED); 另一种发光面与 PN 结平面垂直, 称为边发光二极管 (ELED)。

双异质结面发光二极管的典型结构, 如图 3-23 所示。由于衬底材料 N-InP 的光吸收很

工作温度升高时,同样的工作电流下 LED 输出功率要下降。例如当温度从 20 ℃升 70 ℃时,输出功率下降一半,但相对 LD 而言,温度的影响较小。

2. 光谱特性和发散角

LED 的水平发散角约为 30°,LED 的垂直发散角约为 120°。在室温下,短波长 GaAlAs 材料制作 LED,谱线宽 $\Delta\lambda$ 约为 25~40 nm,而对长波长 InGaAsP 材料制作的 LED, $\Delta\lambda$ 在 75~100 nm 之间。

由于 LED 的发射谱线宽,使光信号在光纤中传输时材料色散和波导色散较严重,而发散角大使 LED 和光纤的耦合效率低,这些因素对光纤通信是不利的。

3. 调制特性

从 LED 的 P - I 曲线可见,它的调制线性好,适合模拟调制。半导体光源 DFB-LD、FP-LD 和 LED 的一般性能如表 3.1 所示。

表 3.1 半导体光源 DFB-LD、FP-LD 和 LED 的一般性能

	DFB-LD		FP-LD		LED	
工作波长 λ (μm)	1.3	1.55	1.3	1.55	1.3	1.55
谱线宽度 $\Delta\lambda$ (nm)	边模抑制比 30~35dB		1~2	1~3	25~40	60~100
阈值电流 I_{th} (mA)	15~20	20~30	20~30	30~60	—	
工作电流 I (mA)	$(1.2\sim1.5) I_{\text{th}}$		$(1.2\sim1.5) I_{\text{th}}$		50~100	50~100
输出功率 P (mW)	20~40	15~30	5~10	5~10	1~5	1~3
入纤功率 P (mW)	10~20	7~15	1~3	1~3	0.1~0.3	0.1~0.2
调制带宽 B (MHz)	500~1000		500~2 000	500~1 000	50~150	30~100
辐射角 $\theta(^{\circ})$			20 \times 50	20 \times 50	30 \times 120	30 \times 120
寿命 t (h)	$10^6\sim10^7$	$10^5\sim10^6$	$10^6\sim10^7$	$10^5\sim10^6$	10^8	10^7
工作温度($^{\circ}\text{C}$)	-20~50	-20~50	-20~50	-20~50	-20~50	-20~50

LED 通常和多模光纤耦合,用于 1.3 μm 或 0.85 μm 波长的小容量短距离系统。因为 LED 发光面积和光束辐射均较大,而多模 SIF 光纤或 G.651 规范的多模 GIF 光纤具有较大的芯径和数值孔径,有利于提高耦合效率,增加入纤功率。LD 通常和 G.652 或 G.653 规范的单模光纤耦合,用于 1.3 μm 或 1.55 μm 大容量长距离系统,这种系统在国内外都得到最广泛的应用。分布反馈激光器(DFB-LD)主要和 G.653 或 G.655 规范的单模光纤或特殊设计的单模光纤耦合,用于超大容量的新型光纤系统,是目前光纤通信发展的主要趋势。

3.2 光检测器件

光电检测器是光接机的关键器件,它的作用是把接收到的光信号转换成电流信号。光纤通信中最常用的光电检测器是 PD 光电二极管、PIN 光电二极管和 APD 雪崩光电二极管。

3.2.1 PD光电二极管

光纤通信中所使用的半导体光电检测器是,都是利用光电效应原理制成的。所谓半导

体光电效应是指一定波长的光照射到半导体 PN 结上，且光子能量大于半导体材料的禁带宽度 ($hf > E_g$) 时，价带电子吸收光子能量跃迁到导带，使导带中有电子，价带中有空穴，从而使 PN 结中产生光生载流子的一种现象，如图 3-26 所示。

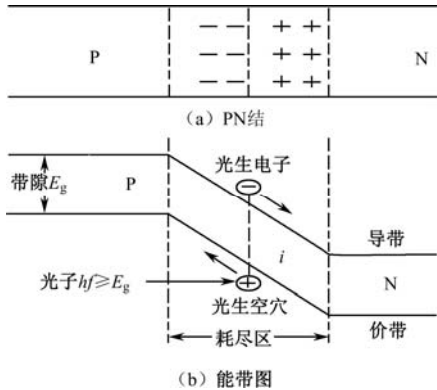


图 3-26 半导体 PN 结及能带图

最简单的半导体光电检测器为 PD (Photo Detection) 光电二极管，它是基于 PN 结的光电效应把光信号转换为电信号的器件。PD 管通过外电路对 PN 结加反向偏压，如图 3-27 所示，当 PN 结两端加有反向偏压时，外加电场与内建电场方向一致，因而在 PN 结界面附近形成相当高的电场耗尽区，当光束入射到 PN 结时，耗尽区内产生的光生载流子立即被高电场（内建场和外建场）加速，以很高的速度向两端运动，从而在外电路中形成光生电流。当入射光功率变化时，光生电流也随之线性变化，从而把光信号转换成电流信号。这种 PD 光电二极管响应速度慢，光电转换效率低。

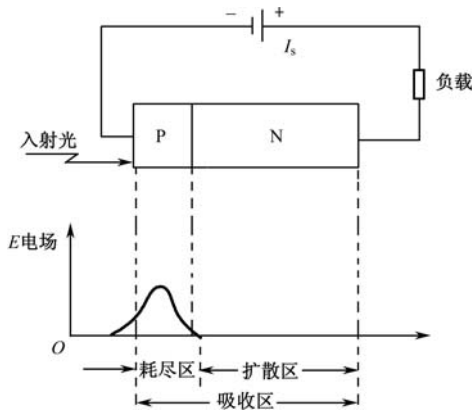


图 3-27 PD 工作原理示意图

3.2.2 PIN光电二极管

PIN 光电二极管示意图如图 3-28 所示。它是在 PD 光电二极管的基础上改进而成的。它由 P, I, N 三层组成。为了提高光电二极管的响应速度和转换效率，就要适当加大耗尽区的宽度，从而使入射光尽可能地在耗尽区被吸收。因此在重掺杂的 P 型和 N 型半导体之

间，设置了一层低掺杂的 N 型半导体，因为这一层的掺杂浓度很低，近乎本征 I 半导体，故称 I 层。在 PIN 管结构中重掺杂 P⁺和 N⁺区非常薄，而低掺杂的 I 区很厚，经扩散作用后可形成一个很宽的耗尽区，这样，在外加反向偏压下，可大大提高 PIN 光电二极管的光电转换效率。

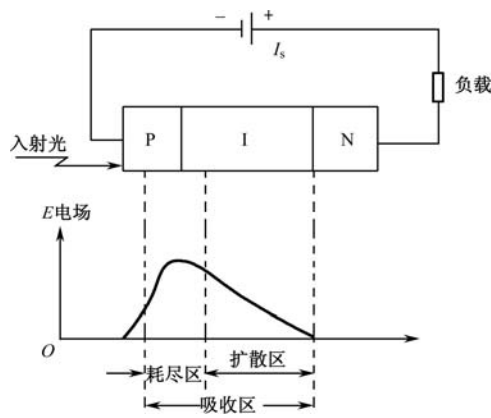


图 3-28 PIN 工作原理示意图

3.2.3 APD雪崩光电二极管

雪崩光电二极管记作 APD，是具有内部电流增益的光电转换器件，可以用于检测微弱光信号，获得较大的输出光电流。

APD 结构如图 3-29 所示，APD 由重掺杂的 P 型、N 型半导体型的中间加入宽度较窄的 P 型半导体层和很宽的轻微掺杂 P 型的 I 层共四层组成。设计上已考虑到使它能承受高反向偏压（约 100~150 V），从而在耗尽区内形成一个高电场区，可高达 3×10^5 V/cm。当耗尽区吸收光子时，激发出来的光生载流子经过高场区被加速，以极高的速度与耗尽区的晶格发生碰撞，使晶体中的原子电离，从而产生新的光生载流子，并连锁反应，使载流子迅速增加，光电流在 APD 管内部获得倍增，形成雪崩倍增效应。APD 就是利用雪崩倍增效应使光电流得到倍增的高灵敏度检测器。

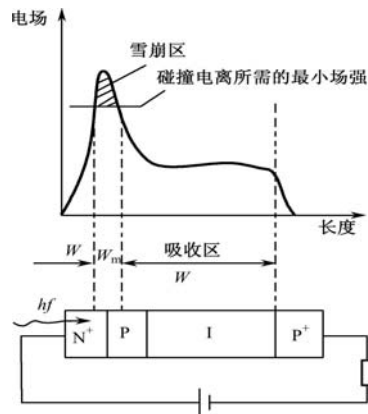


图 3-29 APD 的结构及电场分布

3.2.4 光电二极管的主要特性

1. 光电效应条件和波长响应范围

光电效应的发生是具有一定条件的。若入射光子能量 hf 小于半导体材料禁带宽度 E_g ，那么无论入射光多么强，光电效应也不会发生。因此，产生光电效应的条件是：

$$hf > E_g \quad \text{或} \quad \lambda < hc/E_g$$

式中， λ 为入射光波长， f 为入射光频， c 真空中光速。

由光电效应的条件可知，对任何一种特定材料制作的光电二极管，都存在耗尽区上截止波长 λ_c 或截止频率 f_c ，其表达式为：

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} \quad \text{或} \quad f_c = \frac{E_g}{h}$$

式中， E_g 是材料的禁带，其单位为电子伏特（eV）， $1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{J}$ ，波长 λ_c 单位为 μm 。例：对 Si 材料制作的光电二极管， $\lambda_c=1.06\mu\text{m}$ ，故可用做 $0.85\mu\text{m}$ 的短波长光检测器。对 Ge 和 InGaAs 材料制作的光电二极管， $\lambda_c\approx 1.6\mu\text{m}$ ，所以可用做 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 的长波长光检测器。

2. 光电转换效率

衡量光电转换效率的特性参数有响应度 R_0 和量子效率 η 。响应度表示单位入射光功率所产生的光电流，用 R_0 表示，单位为 A/W，即：

$$R_0 = \frac{I_p}{P} \quad (3.12)$$

式中， I_p 是光生电流； P 入射光功率。量子效率定义为转换形成光电流的电子—空穴对数与入射光子数之比，用 η 表示，即：

$$\eta = \frac{\text{形成光生电流的载流子数}}{\text{入射到光敏面的总光子数}} = \frac{I_p/e}{P/hf} = \frac{I_p hf}{P e_0} \times 100\% \quad (3.13)$$

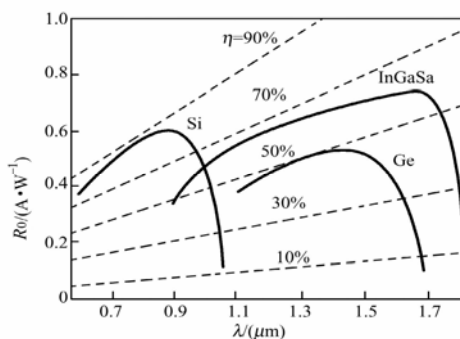
η 和 R_0 之间的关系为：

$$\eta = \frac{I_p/e_0}{P_0/(hf)} = \frac{I_0}{P_0} \times \frac{hf}{e_0} = R_0 \frac{hf}{e_0}$$

$$\text{或 } R_0 = \eta \frac{e_0}{hf} \approx \frac{\eta \lambda}{1.24}$$

式中，电子电荷 $e_0=1.6\times 10^{-19}\text{C}$ ， λ 的单位取 μm 。如果 $\lambda=0.85\mu\text{m}$ ， $\eta=80\%$ ，则 $R_0=0.55\text{A/W}$ ，表明 1mW 的光功率入射到光电二极管上，可产生 0.55mA 的光电流。

从光电二极管的光电效应条件，可以看出半导体材料的光电转换效率与入射光波长有关的，图 3-30 是由不同材料制成的 PIN 管响应度、量子效率与波长的关系曲线。从图中可见，Si 光电二极管的波长响应范围为 $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ ，其中在 $0.85\mu\text{m}$ 处 $\eta=90\%$ 、 $R_0=0.55\text{A/W}$ 。Ge 和 InGaAs 光电二极管的波长响应范围为 $1.1\sim 1.6\mu\text{m}$ ，适用于长波长波段。

图 3-30 PIN 管响应度 R_0 、量子效率 η 与波长 λ 的关系曲线

3. 光/电响应速度和频率特性

响应速度是指光电二极管接收到光子后产生光生电流输出的速度，它常用响应时间，即上升时间和下降时间来表示。

光电二极管在接收机中使用，通常有偏置电路，并与放大器相连。图 3-31 为光电二极管电路及其等效电路， C_d 是它的结电容， R_s 是它的等效串联电阻，其值很小； R_L 是它的负载电阻； C_a 和 R_a 是光电二极管之后的放大器的输入电容和输入电阻。

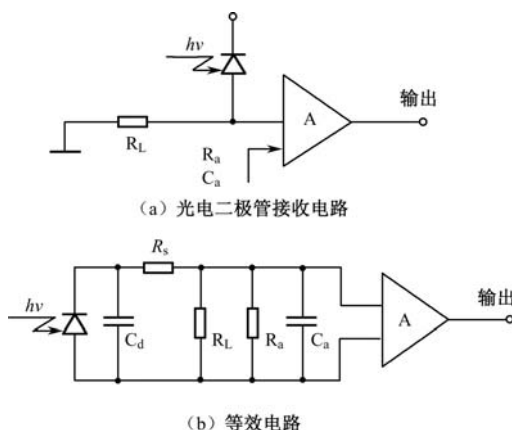


图 3-31 光电二极管电路

光电二极管进行光/电转换的响应速度与 RC 电路的上升时间、光生载流子的产生、在耗尽层中渡越、复合及耗尽层外载流子的扩散时间有关。

光电二极管等效电路中无源并联支路构成 RC 低通滤波器，其通带上限频率为：

$$f_c = 1/2\pi R_T C_T \approx 1/2\pi R_L C_d$$

式中， $R_T = R_L // R_a$ ； $C_T = C_d // C_a$ ， $C_d = \epsilon A / W$ ，其中 ϵ 为材料的介电常数， A 是 P-N 结区面积， W 为耗尽区宽度。由分析，可近似求得光电二极管的上升时间 t_r 和下降时间 t_f 为：

$$t_r = t_f = 2.2 t_0 \approx 2.2 R_L C_d$$

式中， t_0 为光电二极管单一时间常数。

4. 暗电流 I_d

暗电流 I_d 定义为无光照射时光电二极管的反向电流，称为暗电流（噪声电流）。Si 的 PIN 管的 I_d 大于 1 nA，Ge 的 PIN 管的 I_d 约几百 nA，InGaAs 的 PIN 管的 I_d 约几十 nA。APD 管的 I_d 由于存在倍增因子 G ，因此其暗电流总是大于同材料的 PIN 管 G 倍。

5. APD管平均倍增因子 G 特性

APD 管有与 PIN 管一样的特性，如光电转换效率、响应速度、暗电流等特性，除此之外，还有倍增因子、过剩噪声等新引入的特性。在此重点介绍这两点特性。

倍增因子 G 定义为倍增后 APD 管输出光生电流 I_M 与未倍增的初始光生电流之比，即

$$G=I_M/I_P$$

APD 增益 G 与反电压 V 的关系可近似用 Miller 公式表示：

$$G=\frac{1}{1-[(V-I_MR_s)/V_B]^n} \tag{3.14}$$

式中， I_M 为 APD 的总输出电流； V_B 为击穿电压； V 为 APD 的反电压； R_s 为 APD 的体电阻； n 为指数与 APD 材料、掺杂以及工作波长有关的参数，通常取值为 1~2.7~7。

对于 APD 响应度为 $R=I_M/P=GI_P/P=GR_0$ ，而量子效率 $\eta=(I_P/e_0)/[P/(hf)]<1$ ， η 仅与初级光生载流子有关，不涉及倍增载流子。

6. APD噪声特性

APD 管由于雪崩倍增的随机性会带来新的噪声，称为过剩噪声。在工程上过剩噪声可用过剩噪声因子 $F(G)$ 表示：

$$F(G)=G^x$$

式中， $0<x<1$ 为过剩噪声指数。Si 材料的 APD 管 $x=0.3\sim0.5$ ，Ge 材料的 APD 管 $x=0.6\sim1.0$ ，InGaAsP/InP 材料的 APD 管 $x=0.5\sim0.7$ 。

光电二极管一般性能如表 3.2 所示。

表 3.2 PIN 和 APD 光电二极管一般性能

种 类	Si-PIN	Si-APD	InGaAs-PIN	InGaAs-APD
响应波长/（ μm ）	0.4~1.1		0.9~1.7	
响应度（ $\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$ ）	0.3~0.55 （0.90 μm ）	0.5~1.2 （0.85 μm ）	0.75~0.95 （1.3 μm ）	0.75~0.95 （1.3 μm ）
量子效率（%）	65~90	77	60~70	60~70
暗电流/（nA）	1~10	0.1~1	1~20	1~5
响应时间/（ns）	0.5~1.0	0.1~2.0	0.06~0.5	0.1~0.5
带宽（GHz）	0.125~1.4	0.2~1.0	0.125~40	1.5~3.5
工作电压/（V）	-45~-100	-100~-220	-15~-5	-60~-30
结电容/（pF）	1.2~3.0	1.3~2.0	0.5~2	<0.5
倍增因子	1	100~500	1	10~60
附加噪声指数	—	0.3~0.5	—	0.5~0.7

3.3 光纤放大器（EDFA）

光纤损耗和色散的存在，使光纤无中继传输距离受限。在大容量长距离光纤通信系统中，延长通信距离的方法是采用光电中继器，即光—电—光中继方式，这种方式设备复杂，成本昂贵，维护不便。为此，人们试图寻找一种新型中继放大器，即光放大器。光放大器直接对传输光信号进行放大，可以省去传统中继方式中的光/电和电/光变换，进而可以引入较小的噪声和处理误差。

光放大器的基本原理如图 3-32 所示，其主要由放大工作介质、泵浦源组成。工作时，工作介质先从泵浦源中吸收足够的能量，处于粒子反转分布，当输入信号光经过此工作介质时两者将发生受激辐射作用，使输入光信号从工作介质中获得能量形成放大的输出信号光，而工作介质中储存的能量发生损失。紧接着，工作介质又从泵浦源中吸收能量，这样的过程不断重复，使源源不断的输入信号光的放大得以继续下去。由此可以看出，输入信号光通过间接吸收泵浦源的能量而获得放大，工作介质起能量传递作用，它把泵浦形式的能量转化成信号光的形式。

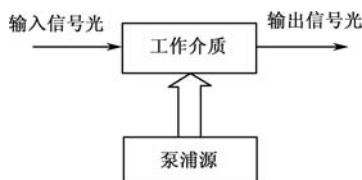


图 3-32 光放大器的基本原理图

光放大器主要应用于以下方面：一是在 DWDM 光纤通信系统中，光放大器可以对一根光纤上同一窗口同时传输的多个光载波进行放大，替代传统的将多信道信号分开，送入各自的光中继设备中，通过光—电—光转换过程来对光信号进行的处理过程。若用掺铒光纤放大器（Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA），有数十至上百纳米的带宽，可以覆盖相当数量的不同波长信道，因而一个光纤放大器就可以代替诸多中继设备对 DWDM 系统的多信道光信号进行放大；二是 EDFA 可以补偿光信号由分路而带来的损耗，扩大本地网的网径，增加用户；三是在光孤子通信中的应用，孤子通信是利用光纤的非线性来补偿光纤色散作用的一种新型通信方式。光孤子脉冲沿光纤传输时，其功率逐渐减弱，这将破坏非线性与色散之间的平衡。解决的方法之一就是在光纤传输线路中每隔一定的距离加一个光放大器，补充线路损耗，使光孤子在传输中保持脉冲形状不变。

光放大器主要有半导体光放大器（Semiconductor Optical Amplifier, SOA），拉曼散射、布里渊散射光纤放大器和掺杂光纤放大器。掺杂光纤放大器包括掺铒光纤放大器（EDFA）、掺镨光纤放大器（POFA）和掺铋光纤放大器（NDFA）。由于掺铒光纤放大器具备一系列优良特性，成为光纤通信系统中的最佳放大器，下面重点讨论 EDFA。

3.3.1 EDFA的结构及原理

EDFA 的基本结构是将稀土元素铒 Er^{3+} 离子注入到光纤芯层中，浓度约为 25 mg/kg 形成 EDFA 的工作介质——掺铒光纤 EDF，在泵浦源激励下可直接对某一段波长的光信号进行放大，其特点是具有高增益、高输出、宽频带、低噪声等一系列优点，是目前应用最广泛的光放大器，为光纤通信带来极其深远的影响。

1. EDFA的基本结构

EDFA 主要由掺铒光纤、泵浦源、WDM、光隔离器等组成，如图 3-33 所示。

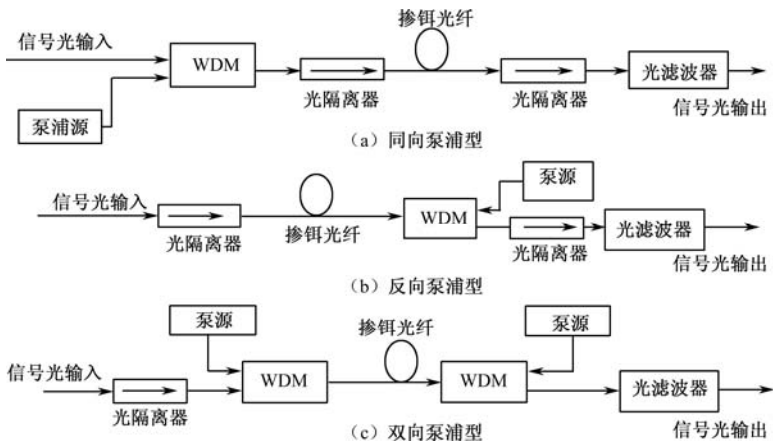


图 3-33 EDFA 的三种典型结构

WDM 的作用是将不同波长的泵浦光和信号光混合送入掺铒光纤。对它的要求是能将两信号有效地混合而插入损耗最小。

光隔离器的作用是抑制光反射对光放大器的影响，保证系统稳定工作。对它的要求是插入损耗低、与偏振无关、隔离度优于 40 dB。

滤波器的作用是滤除放大器的噪声，提高系统的信噪比。

泵浦源的作用是提供足够的光功率使掺铒光纤处于粒子反转分布。泵浦源即为半导体激光器，输出功率为 10~100 mW，工作波长有 1480 nm，980 nm 和 800 nm 三种。

掺铒光纤应具有一定的长度（10~100 m）和一定的增益。

EDFA 放大过程是：在泵浦源作用下的掺铒光纤得到粒子数反转分布，再通过信号光与此时的掺铒光纤的相互作用，即受激辐射，信号光便得到放大，实质是泵浦光将能量转移给信号光，从而使信号光得到放大。

EDFA 的泵浦形式有同向泵浦、反向泵浦和双向泵浦三种，如图 3-33 所示。同向泵浦是信号光与泵浦光从同一端注入掺杂光纤的方式，其优点是：结构简单，噪声性能较好；反向泵浦是泵浦光与信号光从不同的方向输入掺杂光纤，两者在光纤中反向传输，其特点是：当光信号放大到很强时，泵浦光也强，不易达到饱和，但噪声性能不佳。为了使掺铒光纤中杂质粒子得到充分的激励，必须提高泵浦功率，可用多个泵浦源激励光纤。双向泵浦结构结合了同向泵浦和反向泵浦的优点，使泵浦光在光纤中均匀分布，增益最高、噪声

性能较好。

2. 掺铒光纤放大器的工作原理

在制造光纤中适量掺入稀土元素铒离子 (E_r^{3+}), 就形成 EDFA 的工作介质——掺铒光纤。掺铒光纤与泵浦源、信号光相互作用的机理, 如图 3-34 所示。

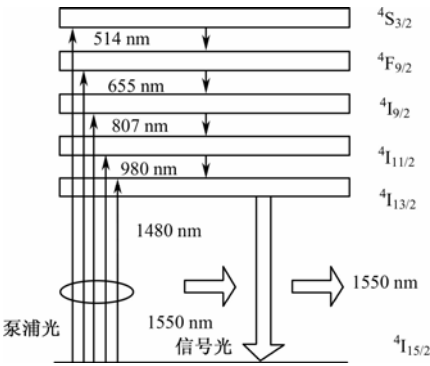


图 3-34 E_r^{3+} 能级示意图

掺铒光纤能放大光信号的基本原理在于 E_r^{3+} 吸收泵浦光的能量, E_r^{3+} 属于分立能级, E_r^{3+} 在未受泵浦光激励的情况下, 掺铒光纤中的 E_r^{3+} 按费米统计分布规律处在基态 $^4I_{15/2}$ 上, 当泵浦光射入, 处于基态上的铒粒子吸收泵浦光子后向高能级跃迁。泵浦光的波长不同, 粒子所跃迁的高能级也不同。例如泵浦光的波长为 1480 nm, E_r^{3+} 粒子先跃迁到 $^4I_{13/2}$ 能级的顶部, 并迅速以无辐射跃迁形式由泵浦态变至亚稳态 (即 $^4I_{13/2}$ 能级的底部)。由于源源不断地进行泵浦, 粒子数不断增加, 从而在 $^4I_{13/2}$ 能级底部与 $^4I_{15/2}$ 能级之间形成粒子数反转分布。当具有 1550 nm 波长的光信号通过这段掺铒光纤时, 亚稳态的粒子以受激辐射的形式跃迁到基态, 并产生出和入射光信号中的光子一模一样的全同光子, 从而大大增加了信号光子数量, 实现了信号光在掺铒光纤中的放大。

3.3.2 EDFA的主要特性

EDFA 的主要特性有增益特性、输出功率特性和噪声特性。

1. 增益特性

增益特性表示了放大器的放大能力, 其定义为:

$$G = 10 \lg \frac{\text{放大器输出信号功率}}{\text{放大器输入信号功率}} = 10 \lg \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

EDFA 的增益大小与多种因素有关, 通常为 15~40 dB。增益光谱范围在 1525~1565 nm。

图 3-35 表示了信号增益与泵浦光功率的关系。小信号输入时增益系数大于大信号输入时的增益系数。若定义增益为 0 dB 时的泵浦光功率为泵浦阈值功率 P_{th} , 则当泵浦功率 P_p/P_{th} 大于 3 时, 放大器增益出现饱和, 即泵浦功率增加很多, 而增益基本保持不变。

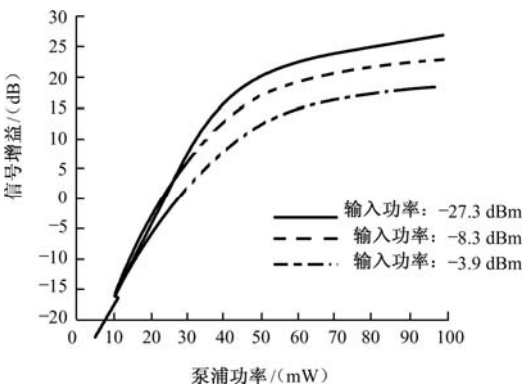


图 3-35 信号增益与泵浦功率的关系

图 3-36 表示了增益与掺铒光纤长度的关系。开始时增益随掺铒光纤长度的增加而上升，但当泵浦光功率一定，掺铒光纤超过一定长度后，其能量不足以使掺铒光纤粒子数反转，此时信号光不仅不能放大，反而被消耗，其 G 为负数。这样就存在一个可以获得最大增益的最佳长度。例如泵浦功率为 30 mW，光纤长度超过 50 m 时，光纤越长反而增益越小，这时 50 m 即为最佳光纤长度（对应的增益为最大）。

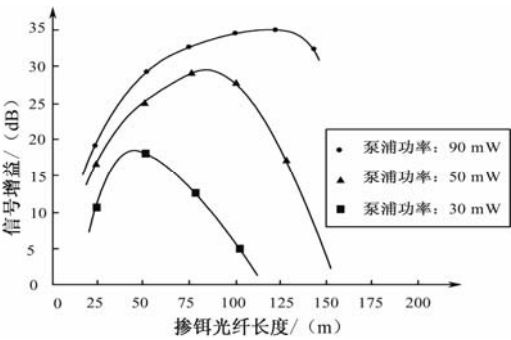


图 3-36 增益与掺铒光纤长度的关系

2. 输出功率特性

理想的光放大器，不管输入功率多高，光信号都能按同一比例被放大，但实际的 EDFA 却并非如此。当输入功率增加时，受激辐射加快，以至于减少了粒子反转数，使受激辐射光减弱，导致增益饱和，输出功率趋于平稳，如图 3-36 所示。

3. 噪声特性

EDFA 的输出光中，除了有信号光以外，还有自发辐射光等，它们被一起放大，形成了影响信号光的噪声源。EDFA 的噪声主要有以下四种：信号光的散粒噪声；放大器的自发辐射（ASE）散粒噪声；信号光与 ASE 光谱之间的差拍噪声；ASE 自身光谱间的差拍噪声。以上 4 种噪声中，后两种影响最大，其功率谱密度如图 3-37 所示。

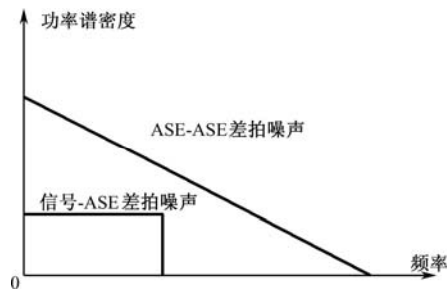


图 3-37 主要噪声功率谱密度

衡量 EDFA 噪声特性可用噪声系数（Noise Figure, NF）来度量，其定义为：

$$NF = \lg \frac{\text{输入端的信噪比}}{\text{输出端的信噪比}} = 10 \lg \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}}$$

由于任何一种放大器都不可避免地要引入噪声，使信噪比降低，因此输出端的信噪比总是比输入端的信噪比低。

对于不同的泵浦波长，噪声系数也略有差异。1480 nm 泵浦源的 NF 约为 4~6 dB；980 nm 泵浦源的 NF 为 3.2~3.4 dB。

实用 EDFA 的构成原理图如图 3-38 所示。表 3.3 列出了国外几家公司 EDFA 商品的技术参数。

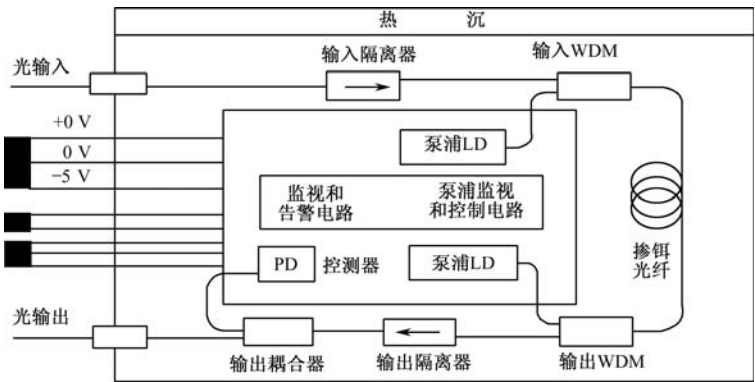


图 3-38 EDFA 的构成原理图

表 3.3 掺铒光纤放大器技术参数

公 司 名 称	型 号	光增益 /(dB)	最大输出 功率/ (dBm)	噪声指 数 /(dB)	工作波长 /(nm)	泵浦波长 /(nm)	工作温度 /(℃)	工作带宽 /(nm)
Tech Sight Inc (加拿大)	FA102	28	10	4.5	1530~1560	980	0~60	30
	FA106	38	16	6	1530~1560	1480	0~60	30
AT&T (美国)	×1706×J	30	11.5	8	1540~1560	1480	-5~40	20
	×10706×Q	35	15.5	8	1540~1560	1480	-5~40	20
BT&D (英国)	EFA200×	40	15	4.5	1530~1565	1480	-40~60	35
	EFA201×	35	15	<4.0	1530~1565	980	-40~60	35

续表

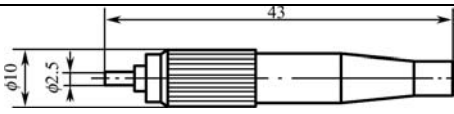
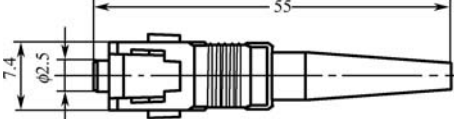
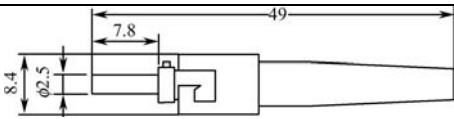
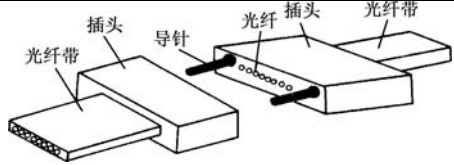
公 司 名 称	型 号	光增益 /(dB)	最大输出 功率/ (dBm)	噪声指 数 / (dB)	工作波长 / (nm)	泵浦波长 / (nm)	工作温度 / (℃)	工作带宽 / (nm)
PITEL (日本)	ErFA1110— 1115	25~33	10~15	<7	1552	1480	0~40	30
	ErFA1118	>35	18	<7	1552	1480	0~40	30
CORNING (康宁)	单泵功放		12~13	4		980	0~65	
	双泵功放		15~16	4		980	0~65	
	双泵 CATV 功放		16	4		980	0~65	
	线路放大	25		4		980	0~65	
	有调谐滤波 器的前放	24~30		4	1530~1560	980	0~65	
	WDM 线路			4				
	放大器	33~34	16.5	4	1549~1561	980	0~65	12

3.4 光纤连接器件

3.4.1 光纤连接器的结构与种类

光纤连接器又称光纤活动连接器，它是实现光纤与光纤之间、光纤与光纤系统或仪表、光纤与其他光无源器件之间的可拆卸连接，它的种类有：FC/FC 平面型、FC/PC 球面型、FC/APC 斜八度型、PC/SC 直插式方头型、ST-Q₉ 式和多芯阵列式，如表 3.4 所示。

表 3.4 各种光纤连接器

光纤连接器种类	形 状
FC/FC 平面型 FC/PC 球面型 FC/APC 斜八度型	
FC/SC 型	
FC/ST 型	
多芯阵列式连接器	

3.4.2 光纤连接器的主要性能指标

1. 插入损耗

插入损耗用 L 表示。若入纤的光功率为 P_T ，出纤的光功率为 P_R ，如图 3-39（a）所示。插入损耗定义为：

$$L = 10 \lg \frac{P_T}{P_R}$$

理想的光纤连接器是 $P_T=P_R$ ， $L=0$ 。这就要求两光纤完善准直，但实际上光纤连接损耗是难以避免的。

2. 回波（反射）损耗

回波（反射）损耗定义为：

$$R_L = 10 \lg \frac{P_T}{P_r}$$

式中， P_T 为入纤的光功率， P_r 为反射的光功率。回波损耗愈大愈好，以减少反射光对光源和系统的影响。

3. 重复性和互换性

重复性是指活动连接器多次插拔后插入损耗的变化，用 dB 表示。互换性是指连接器各部件互换时插入损耗的变化，也用 dB 表示。常用光纤连接器的结构特点和性能指标如表 3.5 所示。

表 3.5 光纤连接器的结构特点和性能指标

类 型 结构和特性		PC/PC	PC/APC	SC/PC	SC/APC	ST/PC
结 构 特 点	插针套管（包括光纤） 端面形状	凸球面	8° 斜面	凸球面	8° 斜面	凸球面
	连接方式	螺纹	螺纹	轴向插拔	轴向插拔	卡口
	连接器形状	圆形	圆形	矩形	矩形	圆形
性 能 指 标	平均插入损耗/dB	≤0.2	≤0.3	≤0.3	≤0.3	≤0.2
	最大插入损耗/dB	0.3	0.5	0.5	0.5	0.3
	重复性/dB	≤±0.1	≤±0.1	≤±0.1	≤±0.1	≤±0.1
	互换性/dB	≤±0.1	≤±0.1	≤±0.1	≤±0.1	≤±0.1
	回波损耗/dB	≥40	≥60	≥40	≥60	≥40
	插拔次数	≥1 000	≥1 000	≥1 000	≥1 000	≥1 000
	使用温度范围/℃	-40~+80	-40~+80	-40~+80	-40~+80	-40~+80

3.4.3 影响光纤连接损耗的因素

引起光纤连接损耗的原因可归为两类：一是相互连接的两光纤结构参数，如数值孔径、模场直径、折射率指数的不匹配；二是由于光纤的耦合不完善、有缺陷。图 3-39(b)~图 3-39(e) 表示了几种常见缺陷：两光纤轴有横向位移 d ；两光纤端面之间有间隙 D ；两光纤轴倾斜成角度 θ ；光纤端面不平整等。下面作扼要介绍。

1. 模场直径不同时的连接损耗

两单模光纤连接时，如输入光纤的模场半径为 ω_1 ，输出光纤的模场半径为 ω_2 ，则连接损耗 α_ω 为：

$$\alpha_\omega = 20 \lg \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2\omega_1\omega_2}$$

在理想情况下 $\omega_1 = \omega_2$ ， $\alpha_\omega = 0$ 。如 $\omega_1 = 4 \mu\text{m}$ ， $\omega_2 = 5 \mu\text{m}$ 时， $\alpha_\omega = 0.21 \text{ dB}$ 。

2. 数值孔径不同时的连接损耗

设输入光纤的数值孔径为 NA_1 ，输出光纤的数值孔径为 NA_2 ，则连接损耗 α_{NA} 为：

$$\alpha_{\text{NA}} = 20 \lg \frac{\text{NA}_1}{\text{NA}_2} \quad \text{NA}_1 \geq \text{NA}_2$$

$$\alpha_{\text{NA}} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{NA}_1 < \text{NA}_2$$

显然，只在 $\text{NA}_1 \geq \text{NA}_2$ 时，才会产生这种损耗，否则损耗为 0。

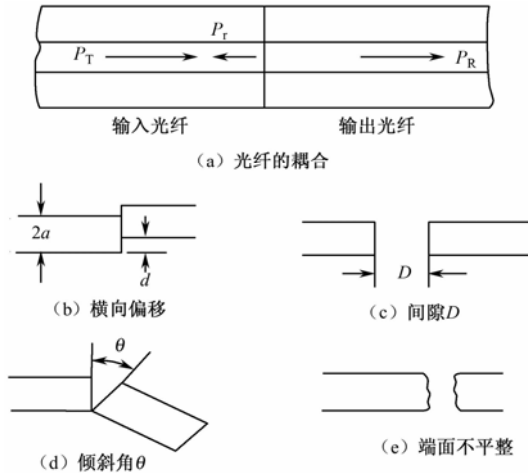


图 3-39 光纤的耦合与耦合缺陷

3. 纤芯错位时的损耗

由于纤芯径向的错位而引起损耗，如图 3-39(b) 所示，则连接损耗 α_d 为：

$$\alpha_d = 10 \lg e^{\left(\frac{d}{\omega}\right)^2}$$

式中, d 为径向错位; ω 为模场半径。

4. 光纤端面间隙损耗

在光纤端面连接处, 由于端面存在间隙而引起的损耗称为端面间隙损耗, 如图 3-39 (c) 所示, 则连接损耗 α_D 为:

$$\alpha_D = 20 \lg \left[1 + \frac{(\lambda D)^2}{2\pi n_2 \omega^2} \right]$$

式中, D 为端面间隙宽度; ω 为模场半径; n_2 为包层折射率; λ 为光波长。

5. 光纤端面倾斜损耗

在光纤连接处, 由于端面倾斜呈斜交时引起的损耗称为倾斜损耗, 如图 3-39 (d) 所示, 则倾斜连接损耗 α_θ 为:

$$\alpha_\theta = 10 \lg e^{\left(\frac{\pi n_2 \omega \theta}{\lambda} \right)^2}$$

式中, θ 为端面倾斜角度; ω 为模场半径; n_2 为包层折射率; λ 为光波长。

3.5 光分路耦合器和波分复用器

3.5.1 光分路耦合器

光分路耦合器的功能是把一个输入的光信号分配给多个或两个输出, 或把多个或两个光信号输入组合成一个输出。光分路耦合器大多与波长无关, 与波长有关的专称为波分复用器/解复用器。

1. 光分路耦合器基本结构

常用的光分路耦合器有 X 状耦合器、Y 状耦合器、星状耦合器、树状耦合器等不同类型, 各具有不同功能和用途。图 3-40 所示是 X 状耦合器, 其功能如表 3.6 所示。X 状 (2×2) 耦合器及 $1 \times N$ 、 $N \times N$ 星状耦合器大多数采用熔融双锥的制造方法, 即将多根裸光纤绞合熔融在一起, 图 3-41 所示是 2×2 的单模光纤耦合机理。在模式混合区, 两根光纤的芯径变小且两个芯区非常靠近, 因而归一化频率 V 显著减小, 导致模场直径增加, 这使两根光纤的消失场产生强烈的重叠耦合, 光功率可以从一根光纤耦合到另一根光纤实现分路耦合功能。根据混合区的长度和包层厚度, 可以在两根输出光纤中获得预期的光功率比例。



图 3-40 光纤耦合器

表 3.6 光分路耦合器的功能

输 入	按比例输出	作 用
P_1	P_4, P_3	分路 (P_2 很小)
P_4, P_3	P_1	耦合 (P_2 很小)
P_2	P_4, P_3	分路 (P_1 很小)

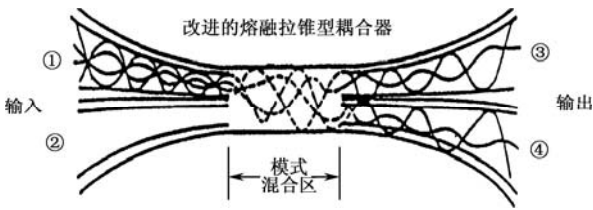


图 3-41 X 状耦合器的耦合机理

星状耦合器 ($N \times M$) 如图 3-42 所示，其功能是把 N 根光纤输入的光功率组合在一起，均匀地分配给 M 根光纤输出， N 和 M 不一定相等，该耦合器通常用做多端功率分配器。

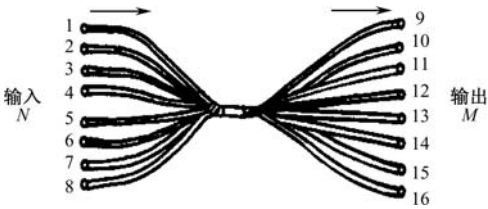


图 3-42 星状耦合器

树状和星状耦合器都可用 2×2 耦合器拼接而成，如图 3-43、图 3-44 所示；星状耦合器应用如图 3-45 所示。将 N 个光节点上光发射机输出的光信号送入星状耦合器，而将组合信号分送入各节点上的光接收机，它使各节点能共享网络系统的软、硬件资源，又能实现大容量信息的低损耗传输。

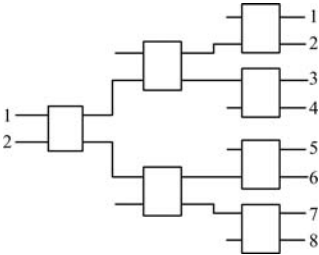


图 3-43 1×8 树状耦合器

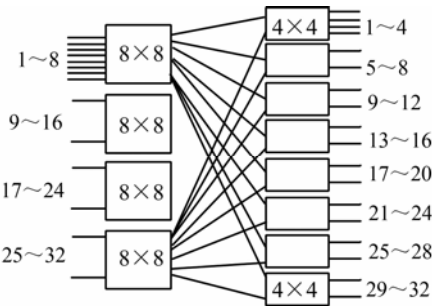


图 3-44 32×32 星状耦合器

2. 光分路耦合器的主要性能指标

光分路耦合器的性能指标有插入损耗、附加损耗、分光比和隔离度等。下面以图 3-40 所示的 X 形耦合器参考模型为例，讨论其主要性能指标。

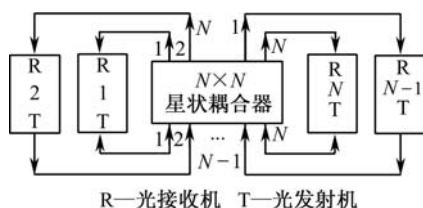


图 3-45 星状光纤网示意图

插入损耗 L_i 是指一个指定输入端的光功率 P_1 与一个指定输出端的光功率 P_4 （或 P_3 ）的比值的对数，用 dB 单位表示为

$$L_i = 10 \lg \frac{P_1}{P_4(\text{或} P_3)}$$

附加损耗 L 是全部输入端的光功率总和 P_1 （或 $P_1 + P_2$ ）与全部输出端的光功率总和 $(P_3 + P_4)$ 比值的对数，用 dB 单位表示为：

$$L = 10 \lg \frac{P_1}{P_3 + P_4}$$

一般情况下，要求 $L \leq 0.5$ dB。

分光比（或耦合比）CR 是一个指定输出端的光功率 P_3 （或 P_4 ）与全部输出端的光功率总和 $(P_3 + P_4)$ 比值的百分比，即

$$CR = \frac{P_3(\text{或} P_4)}{P_3 + P_4} \times 100\%$$

隔离度 DIR 反映光分路耦合器反向散射信号的大小参数，是指一个输入端光功率 P_1 与由耦合器反射到其他输入端的光功率 P_2 （或 P_r ）的比值的对数，用 dB 单位表示为

$$DIR = 10 \lg \frac{P_1}{P_2(\text{或} P_r)}$$

实际上端口 2 还可能有少量光功率 P_2 输出，其大小表示 1、2 端口隔离程度。一般情况下，要求 $DIR > 20$ dB。

3.5.2 波分复用器和解复用器

波分复用器和解复用器是一种与波长有关的耦合器，是构成多波长光纤通信系统的关键器件。波分复用器也叫合波器用于发射端，将多个波长的光信号合并在一起并送入到一根光纤传输；而将一根光纤传输来的多个波长的复合光信号，按不同光波长分开的是解复用器也叫分波器，它用于接收端。从原理上讲，该器件是互易的，即可以作合波器也可以作分波器。在 WDM 系统中用的波分复用器主要有光栅型、多层介质膜型和熔融拉锥全光纤型等。

1. 光栅型波分复用器

所谓“光栅”是指在一块能够透射或反射的平面上刻画平行且等距的槽痕，形成许多具有相同间隔的狭缝。当含有多波长的光信号在通过光栅时产生衍射，不同波长成分的光信号将以不同的角度出射，因此，该器件与棱镜的作用一样，均属角色散型器件，其原理

如图 3-46 所示。

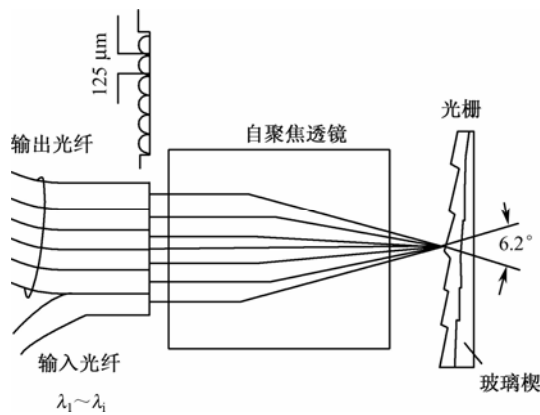


图 3-46 光栅型波分复用原理图

在 WDM 系统中，光栅主要用在解复用器中，以分离出各个波长。图 3-47 是光栅型波分复用器的两个例子。

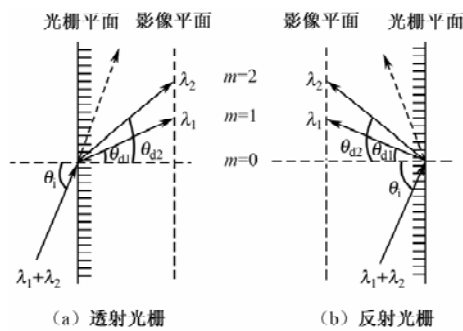


图 3-47 光栅平面分光原理

以透射光栅为例来说明光栅的分光原理。如图 3-47（a）所示，设两个相邻缝隙间的距离即栅距为 d ，光源离光栅平面足够远（相对于 d 而言）， θ_i 和 θ_{dm} 分别是入射光束与衍射光束和光栅平面法线的夹角，根据光栅方程为：

$$d(\sin \theta_{dm} \pm \sin \theta_i) = \pm m \lambda_m \quad (m = 1, 2, 3 \cdots)$$
$$\sin \theta_{dm} = \pm \frac{m \lambda_m}{d} \mp \sin \theta_i$$

式中， m 表示对应的某一波长光线衍射后出现的一种方向，称光谱级。当 d 和 θ_i 一定时，光谱级确定后则 m 不变，则此时衍射角 θ_{dm} 随 λ_m 的改变而改变。即不同波长的光衍射后方向不同。例如光栅栅距为 $d=5 \mu\text{m}$ ， $m=1$ ，即一级衍射， $\theta_i=0$ ，需要分开的是 1540.56 nm 和 1542.16 nm 波长，其衍射角是 $\theta_{d1}=\arcsin (1.540 \ 56/5)=17.945^\circ$ 和 $\theta_{d2}=\arcsin (1.542 \ 16/5)=17.955^\circ$ ，反射光栅的分光原理与透射光栅类似。

2. 多层介质膜型（MDTFF）波分复用器

棒透镜（自聚焦棒）是折射率呈渐变分布的玻璃棒，其直径约 $1\sim5 \text{ mm}$ ，光波在这种

玻璃棒中的传输轨迹呈正弦曲线，一个周期的长度称为节距。1/4 节距的棒透镜既可作为准直光束元件，又可作为聚焦光束元件，两个这样的透镜可构成一个平行光路。在平行光路的两个 1/4 节距的棒透镜之间，插入分光介质膜，就可以使某一波长的光信号能量透射，某一波长的光信号能量反射，从而达到分光耦合的目的，如图 3-48 所示。

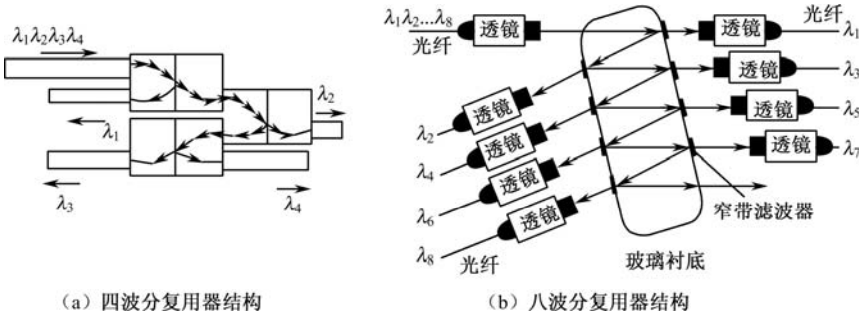


图 3-48 多层介质膜型波分复用器

3. 熔融拉锥全光纤型波分复用器

熔融拉锥型波分复用器是将两根或多根光纤靠贴在一起适度熔融而成的一种表面交互式器件，可以通过控制融合段的长度和不同光纤之间的互相靠近程度，实现不同波长的复用或解复用。熔融拉锥型波分复用器主要应用于 1310 nm/1550 nm 的 WDM 系统，配合掺铒光纤放大器应用的是 980 nm/1550 nm 和 1480 nm/1550 nm WDM 系统、光学监控系统应用的是 1510 nm/1550 nm 的 WDM。两纤的熔融拉锥型波分复用器的插入损耗小（单级最大插入损耗小于 0.5 dB，典型值为 0.2 dB），工艺简单，适合于批量生产，但相邻信道的隔离度较差（30 dB 左右），且外形尺寸稍大。采用多个熔融式耦合器级联应用的方法，可以改进隔离度（提高到 30~40 dB）。两纤的 X 状熔融拉锥型波分复用器，如图 3-49 所示。

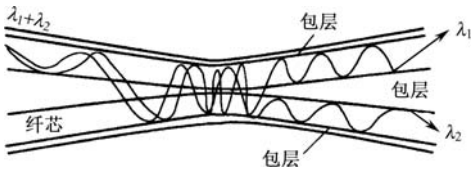


图 3-49 熔融拉锥型波分复用器原理图

4. 集成光波导波分复用器

集成光波导型波分复用器是以光集成技术为基础的平面波导型器件，典型制造过程是在硅晶片上沉积一层薄薄的二氧化硅玻璃，并利用光刻技术形成所需要的图案，腐蚀成形。该器件可以集成生产，在今后的接入网中有很大的潜在应用，而且，除了波分复用器之外，还可以制成矩阵结构，对光信道进行上下分插（OADM），是今后光传送网络中实现光交换的优选方案。

使用集成光波导波分复用器较有代表性的是日本 NTT 公司制作的阵列波导光栅（Arrayed Waveguide Grating, AWG）光合波分波器，它具有波长间隔小、信道数多、通带

平坦等优点，非常适合于超高速、大容量 WDM 系统使用，其结构示意图如图 3-50 所示。这种器件由 N 个输入波导、 N 个输出波导、两个 $N \times N$ 星状耦合器以及一个平板阵列波导光栅组成，这种光栅相邻波导间具有恒定的路径长度差 ΔL ，通常为几十微米，设信道波道的有效折射率为 n_{eff} 。输入光从第一个星状耦合器输入，该耦合器把光功率几乎平均地分配到波导阵列中的每一个，由于阵列波导中的波导长度不等，相位延迟也不等，其相邻波导的相位差为：

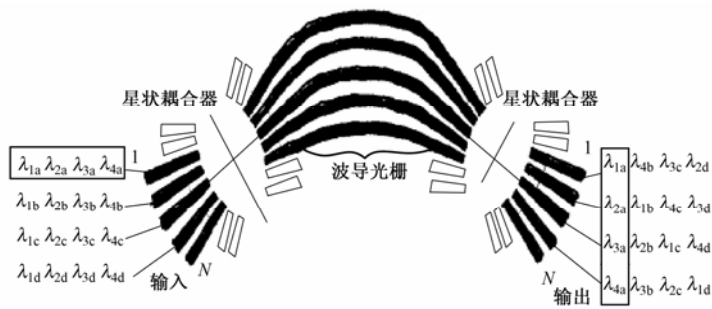


图 3-50 AWG 波分复用和路由特性

$$\Delta\phi = k \times \Delta L = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} \Delta L$$

这里， λ 是信号波长； k 为介质相位常数。由上式看出输出端口与波长有一一对应的关系，也就是说，由不同波长的入射光束经阵列波导光栅传输后，根据波长的不同出现在不同的波导出口上。

AWG 特性如表 3.7 所示，波长间隔从 15 nm 到 0.2 nm，信道数从 8 扩大到 128。表 3.8 是各种 WDM 器件的主要性能比较。

表 3.7 AWG 波分复用器的性能

信道间隔 $\Delta\lambda$ /(nm)	15	1.6	0.8	0.8	0.2	不等间隔
信道间隔 Δf /(GHz)		(200 GHz)	(100 GHz)	(100 GHz)	(25 GHz)	0.8/0.48
信道数 N	8	8	32	64	128	16
插入损耗/(dB)	24	6.1	2.1	2.8	3.5	2.8
3dB 带宽 FWHM	6.3 nm	124 GHz	40 GHz	44 GHz	11 GHz	30.2 GHz
FWHM/ $\Delta\lambda$	42%	62%	40%	44%	44%	
串扰/(dB)	<-28	<-27	<-28	<-29	<-16	<-25

表 3.8 各种 WDM 器件的性能比较

器件类型	机理	批量生产	通道间隔/(mm)	通道数	串音/(dB)	插入损耗/(dB)	主要缺点
衍射光栅型	角色散	一般	0.5~10	4~131	≤-30	3~6	温度敏感
介质薄膜型	干涉/吸引	一般	1~100	2~32	≤-25	2~6	通路数较少
熔锥型	波长依赖型	较容易	10~100	2~6	-45~-10	0.2~1.5	通路数少
集成光波导型	平面波导	容易	1~5	4~32	≤-25	6~11	插入损耗大

在实用 DWDM 系统中,当波分复用的光信道数小于 16 时,几乎所有的公司都采用了无源的 3 dB 耦合器组成合波器,如图 3-51 所示。

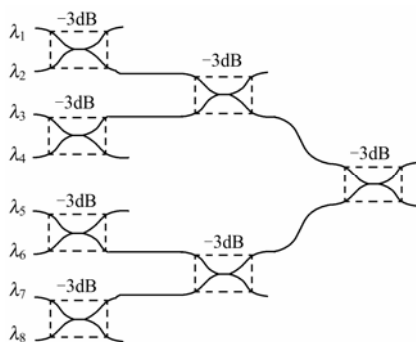


图 3-51 3 dB 耦合器组成光复用器

5. 波分复用器的性能指标

光波分复用器是波分复用系统的重要组成部分,为了确保波分复用系统的性能,对波分复用器的基本要求是:插入损耗小,隔离度大,带内平坦,带外插入损耗变化陡峭,温度稳定性好,复用通路数多,尺寸小等。如图 3-52 所示,其性能指标如下所述。

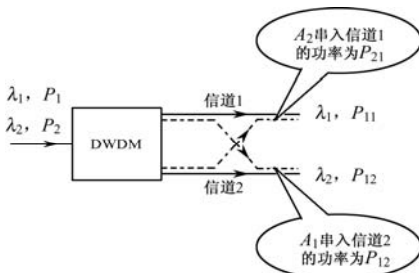


图 3-52 两波分复用器示意图

1) 插入损耗

插入损耗是指由于增加光波分复用器/解复用器而产生的附加损耗,定义为该无源器件的输入和输出端口之间的光功率之比,即:

$$L_1 = 10 \lg \frac{P_1}{P_{11}}$$

其中, P_1 为 λ_1 波长光信号对应的输入的光功率; P_{11} 为 λ_1 波长光信号对应输出的光功率。

2) 串扰(或隔离度)

串扰是指其他信道的光信号耦合进某一信道,并使该信道传输质量下降的影响程度,有时也可用隔离度来表示这一程度。对于解复用器的隔离度为:

$$C_{ij} = 10 \lg \frac{P_i}{P_{ij}}$$

其中, P_i 是波长为 λ_i 的光信号的输入光功率, P_{ij} 是波长为 λ_i 的光信号串入到波长为 λ_j 信道的光功率,串扰大小由一个信道耦合到另一个信道中的信号大小表示。

3) 回波损耗

回波损耗是指从无源器件的输入端口返回的光功率与输入光功率之比，即：

$$R_L = 10 \lg \frac{P_i}{P_r}$$

其中， P_i 为发送进输入端口的光功率， P_r 为从同一个输入端口接收到的返回光功率。

4) 工作波长范围

是指 WDM 器件能够按规定的性能要求工作的波长范围（ λ_{\min} 到 λ_{\max} ）。

5) 信道宽度（信道带宽）

是指各光源之间为避免串扰应具有波长间隔。信道带宽是分配给某一特定光源波长范围，即 $\lambda_1 + \Delta\lambda$ ，若 $\Delta\lambda$ 足够宽可使相邻光源 λ_1 、 λ_2 之间的隔离效果好，避免不同光源之间的串扰。

3.6 光隔离器与光环行器

3.6.1 光隔离器

光隔离器是一种只允许单方向传输光波，而阻碍光波往其他方向特别是往反方向传输的器件。对于光隔离器的要求是正向入射光的插入损耗约 1 dB，对反向光的隔离度大致为 40~50 dB。

光隔离器的工作原理如图 3-53 所示，它由两个线偏振器中间加一个法拉第旋转器制成。法拉第旋转器利用法拉第磁光效应原理使通过它的偏振光的方向发生偏转。当在偏振光的传播方向外加磁场时，其偏振方向旋转一个角度 θ ， θ 可用下式求得：

$$\theta = \rho H L$$

式中， ρ 是材料的 Verdet 常数； H 是外加磁场的感应强度； L 是材料厚度。

线偏振器有一透光轴，对理想的偏振器，沿透光轴平行方向偏振光能完全通过；而与之垂直的偏振光完全被阻止；中间状态就部分通过。

下面说明光隔离器的工作原理。图 3-53 中线偏振器 A 的透光轴为 x 方向，线偏振器 B 的透光轴与 x 方向夹角成 45° 。法拉第旋转器的旋转角 $\theta = 45^\circ$ 。对正向光，入射光经偏振器 A，偏振方向沿 x 轴，经法拉第旋转器顺时针旋转过 45° 角，与偏振器 B 的透光轴方向一致，因而能顺利通过。对反向光，由偏振器 B 出来的偏振光经法拉第旋转器后仍沿顺时针方向旋转 45° 角，恰与偏振器 A 的透光轴垂直，因而完全被阻止。

光隔离器的特性指标是插入损耗 L 和隔离度 I 。设 P_{i1} 、 P_{o1} 分别为正向传输时的输入和输出功率，而 P_{i2} 、 P_{o2} 分别为反向传输时的输入和输出功率，则插入损耗（指正向插入损耗）为：

$$L = 10 \lg \frac{P_{i1}}{P_{o1}}$$

反向插入损耗为：

$$L^* = 10 \lg \frac{P_{i2}}{P_{o2}}$$

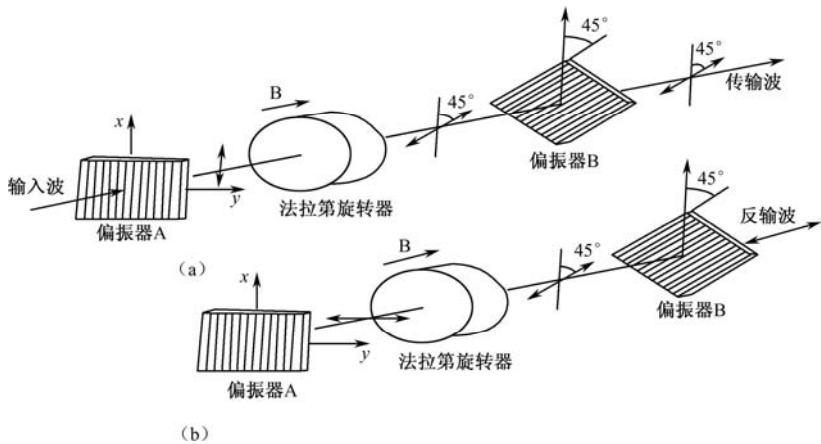


图 3-53 光隔离器工作原理

隔离度 I 则为反向插入损耗与正向插入损耗之差：

$$I=L^*-L$$

3.6.2 光环行器

环行器除了有多个端口外，其工作原理与光隔离器类似。如图 3-54 所示，典型的环行器一般有三个或四个端口。在三端口环行器中，端口 1 输入的光信号只在端口 2 输出，端口 2 输入的光信号只在端口 3 输出，端口 3 输入的光信号只在端口 1 输出。光环行器主要用于光分插复用器中。

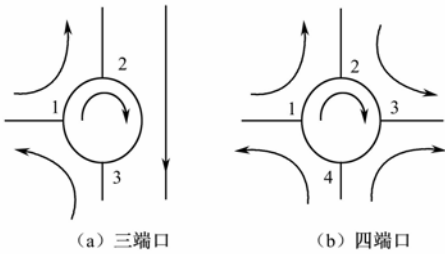


图 3-54 光环行器功能示意图

光环行器用于双向传输系统，如图 3-55 所示。光环行器性能指标定义与光隔离器相似，这里不再复叙。光环行器的插入损耗一般为 0.5~1.5 dB，反向损耗和隔离度均大于 50 dB。

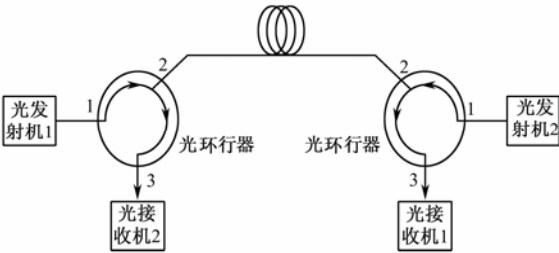


图3-55 光环行器用于双向传输系统

3.7 光衰减器和光开关

3.7.1 光衰减器

光衰减器在光纤通信、光信息处理、光学测量和光计算机中都是不可缺少的一种光无源器件。其功能是在光信息传输过程中对光功率进行预定量的光衰减。光衰减器衰减光功率的工作原理主要有三种：一是位移型衰减器，主要利用两纤对接发生一定的横向或轴向位移，使光能量损失；二是反射型衰减器，主要利用调整平面镜角度，使两纤对接的光信号发生反射溢出损失光能量；三是衰减片型衰减器，主要利用具有吸收特性的衰减片制作成固定衰减器或可变衰减器。三类光衰减器原理及说明如表 3.9 所示。

表 3.9 三类光衰减器原理及说明

种 类	图 示	说 明
位移型光衰减器		L_1, L_2 为微透镜，其轴线位移 d ，通过改变 d 的大小来控制衰减大小
反射型光衰减器		RL 为对 $\lambda/4$ 自聚焦透镜，它可以把处于输入端面的点光源发出的光线在输出端面变换成平行光，反之可把平行光线变换成点光源。 M 为镀了部分透射膜的平面镜
衰减片型光衰减器		A 为可连续吸收片，B 为阶跃吸收片，其不同位置上的衰减量不等。旋转 A 可以连续衰减入射光，旋转 B 则是阶跃衰减入射光

对光衰减器的主要要求有：精度高、衰减量的重复性好、可靠性好、衰减量随波长的变化小、体积小、重量轻等。光衰减器可分为固定衰减器和可变衰减器两类，固定衰减器的衰减量是一定的，具体规格有 3 dB、6 dB、10 dB、20 dB、30 dB、40 dB 的衰减量，典型的反射型光衰减器就属于固定衰减器。可变衰减器，其衰减范围可达 60 dB，典型的衰减片型光衰减器就属于可变衰减器。

3.7.2 光开关

光开关是一种光路控制器件，实现光通道某一个向一个或多个可选择通断或转换。它

是建立对光传输线路监测、光纤传感系统或复杂网络两点间的光信号物理连接或光交换操作的重要器件。

光开关可分为两大类：一类是机械式光开关，另一类是非机械式的波导光开关。

1. 机械式光开关

机械式光开关有移动光纤式和移动光学元件式，其原理是利用电磁铁或步进电机移动光纤或棱镜、反射镜等中间物实现光路转换。图 3-56 所示的是移动光纤式光开关，在典型的 1×2 移动光纤式光开关，其输出一端的光纤固定，而另一端的光纤是活动的，通过移动活动光纤，使之与固定光纤中不同端口相耦合，从而实现光路的切换。典型的 $1 \times N$ 移动光纤式机械光开关，它用电磁铁驱动活动臂移动，切换到不同的固定臂光纤。

这种光开关的优点是插入损耗低（典型值为 0.5 dB ），隔离度高（可达 80 dB 以上），不受偏振和波长影响，适合单模光纤，并且技术上容易实现。但是，它的最大缺点是开关时间长（毫秒级，约为 15 ms ），限制了它的应用范围。机械式光开关是光透明的，即它不受调制速率及调制方式的限制，这也是它的一大优点。

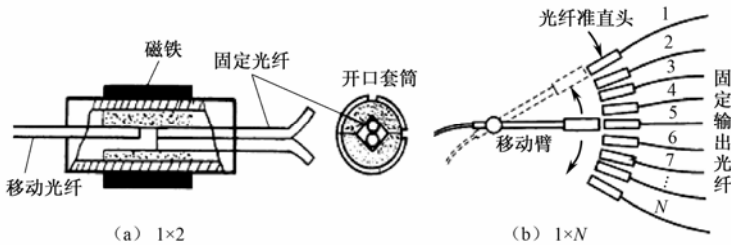


图 3-56 移动光纤式机械光开关

2. 非机械式光开关（或电子式光开关）

非机械光开关，它利用磁光、电光或声光以及热光效应来改变波导折射率，实现光路转换，另外也有利用极化旋转器做成的光开关。从广义上讲，全光网络中有些重要的节点设备如路由器、全光交叉连接器、光分插复用器及波长转换器等，也可划入光开关之列。

下面举一个马赫-曾德尔（M-Z）干涉型电光开关例子来说明非机械式的波导型光开关的工作原理。M-Z 干涉型电光开关结构，如图 3-57 所示。波导型光开关采用铌酸锂（ LiNbO_3 ）或 GaAs 等半导体材料为衬底，制造上面两条（或多条）光波导形成定向耦合器，并且在这两条光波导上面分布着表面电极，通过电极上的调制电压 V 来控制光信号的通断。从而实现对光的开关或调制。

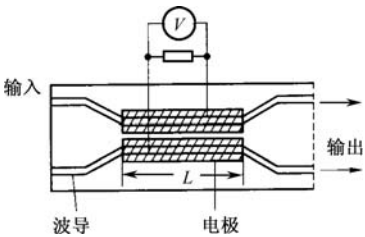


图 3-57 M-Z 干涉型电光开关

非机械式光开关是近年来非常热门的研究课题，其优点是开关时间短，达到纳秒量级，结构小型化和操作方便，缺点是插入损耗大（可达几 dB ）等。

3.8 偏振控制器和光调制器

3.8.1 偏振控制器

偏振控制器控制光的偏振态，可将任意偏振态的输入偏振光转变为输出端指定的偏振状态。光纤型偏振控制器便于与光纤系统连接做成“在线”元件，损耗小，因而受到重视，图 3-58 所示为光纤型偏振控制器装置图。偏振控制器有广泛的应用，例如在单模光纤与光波导的耦合中，通过偏振控制使光纤与光波导中的偏振态匹配以提高耦合效率。又如在相干光纤通信系统中，使本振光与信号光的偏振态匹配，以提高系统的接收灵敏度。

已提出的偏振控制器的方案很多，但基本上是由光延迟器（或称波片）通过改变延迟量或主轴方向来实现偏振控制。以改变延迟量偏振控制器为例子，如图 3-59 所示，对其工作原理加以说明。对单模光纤偏振控制器，它由两个相位波片 FC_1 和 FC_2 串接构成。两个波片皆用光纤线圈做成。 FC_1 相当于 $\pi/2$ 的相位延迟器。 FC_2 相当于 π 的相位延迟器。它们可以绕轴转动。

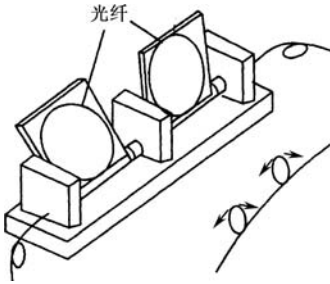


图 3-58 光纤型偏振控制器装置

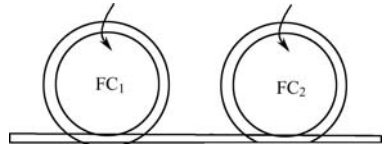


图 3-59 光纤型偏振控制器

光纤延迟器的作用是把线偏振光原方向通过相位延迟量变为指定方向的线偏振光，假设线偏振光原方向为 y ，现要变为指定的 x 方向。

光纤延迟器是应用弯曲光纤形成的弹光效应所产生的线双折射构成。光纤外半径为 A 的单模光纤绕成曲率半径为 R 的光纤线圈，其双折射率 $\Delta\beta_L$ 的计算公式为：

$$\Delta\beta_L = -0.25k_0n^3(p_{11} - p_{12})\left(\frac{A}{R}\right)^2(1 + \mu) = \frac{0.273n^3A^2}{R^2\lambda_0}$$

式中， $k_0=2\pi/\lambda_0$ ； λ_0 为光波长； n 为未受应力时光纤材料的折射率； $p_{11}=0.12$ ， $p_{12}=0.27$ 为光纤材料的弹光系数； $\mu=0.16$ 为光纤材料的泊松比。若光纤绕 N 圈，则其延迟量为：

$$\phi = \Delta\beta_L 2\pi RN = 0.273n^3A^2 \frac{2\pi N}{\lambda_0 R}$$

从而有：

$$\frac{R}{N} = \frac{0.546\pi n^3 A^2}{\lambda_0 \phi}$$

若延迟器的延迟量 ϕ 给定,则可求出光纤线圈的曲率半径 R 与圈数 N 的比值。应该指出, R, N 的解答不止一组,应考虑对损耗的影响而取合适的值。

3.8.2 光调制器

在光纤通信中,必须对将要传输的信号进行光调制。调制的方式分为内调制和外调制,通常为了避免内调制所产生的线性调频的限制,需采用外调制方式,即把激光的产生和调制分开,因而不会影响激光器工作的稳定性,传输质量较高。

调制器可以用电光效应、磁光效应或声光效应来实现。最有用的调制器是利用具有强电光效应的铌酸锂(LiNbO_3)晶体制成的,这种晶体的折射率 n 受外加电场强度 E 影响,可用 E 的泰勒级数表示:

$$n=n_0+\alpha E+\beta E^2+\cdots \quad (3.15)$$

式中, n_0 为 $E=0$ 时晶体的折射率, α 和 β 分别是线性电光效应和二次电光效应系数,其值和偏振面与晶体轴线的取向有关。根据不同取向,当 $\beta=0$ 时, n 随 E 按比例变化,称为线性电光效应或普克尔(Pockel)效应;当 $\alpha=0$ 时, n 随 E^2 按比例变化,称为二次电光效应或克尔(Kerr)效应。调制器通常是利用线性电光效应实现的,因为折射率 n 随外加电场 E (电压 U)而变化,改变了入射光的相位和输出光功率。图 3-60 是 M-Z 干涉型调制器的简图,在 LiNbO_3 晶体衬底上,制作两条光程相同的单模光波导,在其中一条波导的两列施加可变电

压 U 。

设输入的调制电信号按余弦变化,则输出光信号的光功率为:

$$P=1+\cos\left(\pi\frac{U_s+U_b}{U_\pi}\right) \quad (3.16)$$

式中, U_s 和 U_b 分别为调制信号电压和偏置电压; U_π 为光功率变化半个周期(相位为 $0\sim\pi$)所需的外加电压,并称为半波电压。由式(3.16)可以看出,当 $U_s+U_b=0$ 时, $P=2$ 为最大;当 $U_s+U_b=U_\pi$ 时, $P=0$ 。

用于幅度调制(AM)的 M-Z 型调制器可以达到如下性能:外加电压 11 V,带宽为 3 GHz 时插入损耗约 6 dB,消光比为 0.006。

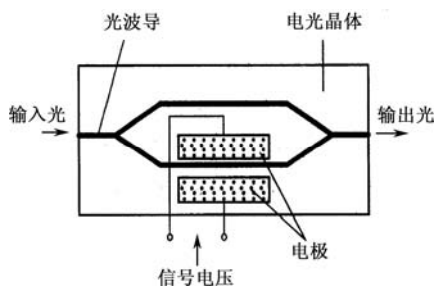


图 3-60 M-Z 干涉型调制器

习 题

1. 写出费米分布函数表示式, 并说明式中各符号含义。
 2. 简述光与物质相互作用的三种基本过程的特点。
 3. 构成激光振荡器要具备的条件有哪些?
 4. 简述 LD 和 LED 的工作原理、 $P-I$ 特性曲线的差异。
 5. 简述 LD 产生张弛振荡和自脉动现象的机理、危害及消除方法。
 6. 简述半导体的光电效应和雪崩增益效应。
 7. 简述 APD 和 PIN 的工作原理及性能上的主要区别。
 8. 简述 EDFA 的工作原理及主要特性。
 9. 简述光纤连接中产生插入损耗的原因, 并介绍减少插入损耗的措施。
 10. 简述光纤定向耦合器和光开关的种类及用途。
 11. 根据光隔离器的工作原理, 设计一个三端口光环行器, 并说明各元件的作用。
 12. 简述各种波分复用器的工作原理, 并比较其性能和特点。
 13. F-P 腔激光器与动态单纵模激光器在特性上有什么异同?
 14. $\lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$ 氦氖激光器, 设气体的折射率 $n=1$, 在腔长 $L=10\text{ cm}$, 100 cm 两种情况下, 计算其纵模的 q 值及纵模谐振频率间隔 Δf_q 。
 15. 计算一个波长为 $\lambda=1\text{ }\mu\text{m}$ 的光子的能量等于多少? 同时计算频率为 $f=1\text{ MHz}$ 和 $f=1\text{ }000\text{ MHz}$ 无线电波的能量。
 16. 半导体激光器发射光子的能量近似等于材料的禁带宽度, 已知 GaAs 材料的 $E_g=1.43\text{ eV}$, 某一 InGaAsP 材料的 $E_g=0.96\text{ eV}$, 求它们的发射波长。
 17. 一个 Si-PIN 光电二极管在 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 波长上的量子效率为 0.7, 计算它的响应度。
 18. 某 PIN 光电二极管, 在 $\lambda=1.55\text{ }\mu\text{m}$ 时, 平均每 3 个入射光子要产生一电子—空穴对, 如果产生的所有电子均被收集起来, 试计算:
 - (1) 器件的量子效率 η 。
 - (2) 其带隙能量的最大可能值。
 - (3) 当接收光功率为 10 mW 时, 其平均输出光电流 I_p 。
- 注: $1\text{ eV}=1.6\times 10^{-19}\text{ J}$, $h=6.625\times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$, $c=3\times 10^8\text{ m/s}$ 。

第4章 光纤通信系统及设计

一个完整的点对点的光纤通信系统如图 1-3 所示，主要由光发射机、光接收机、光中继器、光纤以及光器件等组成。光纤和光器件在前 3 章已经讨论了。本章将从构成一个实际系统的角度讨论光接收机、光发射机的组成、工作原理、系统指标、系统设计等。

光纤通信系统按传输信号种类来分，有模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统，本章重点讨论数字光纤通信系统。按光调制方式来分，有直接（强度）调制—直接检波（Intensity Modulation-Direct Detection, IM-DD）系统和间接调制—检波系统，即发射机用信号调制光载波，接收机用检测器直接检测光信号。直接调制适用于 LD、LED 器件，它可把信息变为电流信号注入 LD 或 LED 光源，使 LD 或 LED 的光功率输出随之而变化；间接调制除了适用于 LD 和 LED 外，还适用于气体、液体、晶体激光器等其他类型的激光器，间接调制是利用调制元件的电光效应、磁光效应、声光效应来实现激光辐射调制的。本章重点讨论 IM-DD 系统。

4.1 两种数字传输体制

数字光纤通信是数字通信与光纤通信系统的优化组合。数字通信具有抗干扰能力强、易于集成、转接交换方便等优点，而光纤频带宽的特点又补偿了数字通信占用频带宽的不足，因此，在通信网中数字通信是光纤通信采用的主要方式。

数字光纤通信系统目前大都采用同步时分复用（TDM）技术，复用又分为若干等级，而且先后有两种传输体制：准同步数字体系（PDH）和同步数字体系（SDH）。PDH 早在 1976 年实现了标准化，目前还在使用。随着光纤通信技术和网络的发展，PDH 遇到了许多困难。在技术迅速发展的推动下，1988 年 ITU-T 参照 SONET（同步光纤网）的概念，提出同步数字传输体系 SDH 的规范建议。SDH 解决了 PDH 存在的问题，是一种比较完善的传输体制，这种体制不仅适用于光信道，也适用于微波和卫星干线传输。PDH 和 SDH 都是面向数字光纤传输系统的数字信号传输体系，与模拟光纤通信系统相比，它对光源特性的线性要求和对接收机的信噪比要求都不高，更能充分发挥光纤的优势，很适合于长距离、大容量和高质量的信息传输。两种制式的数字光纤通信系统的构成如图 1-5 所示。

4.1.1 准同步数字体系PDH

在数字传输系统中，由模拟话音信号变换为数字信号进行传输时，每一路话音占用的速率一般为 64 kb/s，通常称为零次群。如果在同一信道中增加容量，必须采用多路复用的方法，提高其传输速率。

根据不同需要和不同传输介质的传输能力，可将不同的速率复接形成一个系列，即由

低向高逐级进行复接，这就是数字复接系列。倘若被复接的支路不由同一时钟源控制，其码速率由于各自的时钟不同而不严格相等，即各支路码流是不同步的，这样的复接称为异步复接；若各被复接支路信号的速率标准相同，称为准同步数字复接体系（PDH）。

对于准同步数字复接体系，国际上有两大系列，即 PCM 基群 24 路系列和 PCM 基群 30/32 路系列。按 ITU-T 相关建议，两类复接系列速率如表 4.1 所示。

表 4.1 PDH 中的速率复接系列

国家或地区	基群/（Mb/s）	二次群 /（Mb/s）	三次群 /（Mb/s）	四次群 /（Mb/s）	五次群 /（Mb/s）	六次群 /（Mb/s）
中国 西欧	$\frac{2.048}{30 \text{ ch}}$	$\times 4 \frac{8.448}{120 \text{ ch}}$	$\times 4 \frac{34.368}{480 \text{ ch}}$	$\times 4 \frac{139.264}{1920 \text{ ch}}$	$\times 4 \frac{564.992}{7680 \text{ ch}}$	$\left[\begin{array}{l} \times 2 \frac{1.13}{15360 \text{ ch}} \\ \times 4 \frac{2.4}{30720 \text{ ch}} \end{array} \right]$
日本	$\frac{1.544}{24 \text{ ch}}$	$\times 4 \frac{6.312}{96 \text{ ch}}$	$\times 4 \frac{32.064}{480 \text{ ch}}$	$\times 4 \frac{97.728}{1440 \text{ ch}}$	$\times 4 \frac{397.20}{5760 \text{ ch}}$	$\times 4 \frac{1.5888}{23040 \text{ ch}}$
北美	$\frac{2.048}{30 \text{ ch}}$	$\times 4 \frac{6.312}{96 \text{ ch}}$	$\times 4 \frac{44.736}{672 \text{ ch}}$		$\left[\begin{array}{l} \times 6 \frac{274.176}{4032 \text{ ch}} \\ \times 12 \frac{564.992}{8064 \text{ ch}} \\ \times 9 \frac{432}{6048 \text{ ch}} \end{array} \right]$	$\left[\begin{array}{l} \times 2 \frac{1.13 \text{ Gb/s}}{16128 \text{ ch}} \\ \times 4 \frac{2.4 \text{ Gb/s}}{32256 \text{ ch}} \end{array} \right]$

注：ch 表示话路数。

4.1.2 同步数字体系SDH

随着信息社会的到来，人们希望现代电信传输网络能够快速、经济、有效地提供各种电路和业务，但由于 PDH 存在的固有缺陷，必须打破 PDH 的思维方式，提出一种全新的体制，以适应现代信息社会的发展。

SDH 是一套可进行同步信息传输、复用、分插和交叉连接的标准化数字信号的结构等级，而 SDH 网络则是由一些基本网络单元组成的、在传输媒质上（如光纤、微波等）具有全世界统一的网络节点接口。SDH 复接方式是由几个支路（低等级支路信号）在同一个高稳定的时钟控制下，它们的码速率是严格相等的，即各支路的码位是同步的。这时，可以将各支路码元直接在时间压缩、移相后进行复接，这样的复接称为同步复接。

1988 年 ITU-T 经充分讨论协商，在 G.707 建议中对 SDH 速率等级做出明确规定，如表 4.2 所示。

表 4.2 SDH 网络节点接口的标准速率

SDH 等级	标准速率（Mb/s）
STM-1	155.520
STM-4	622.080
STM-16	2488.320
STM-64	9753.280

4.2 光 发 射 机

4.2.1 光源直接强度调制

要实现光纤通信，首先要解决如何将信号加载到光源的发射光束上，即光调制。经调制后的光波通过光纤送至接收机，进行光解调，还原出原来的信号。

光调制就是用电信号（调制信号）去改变光载波的某一特征参量，如光载波的幅度、相位、频率，使其输出的特征参量随电信号而变化。

光调制可分为直接强度调制 IM 和间接调制两大类，下面只介绍 IM 方式。

1. 光源的模拟调制

IM 方式只适用于半导体光源 LD 和发光二极管 LED。这是因为 LD 和 LED 输出功率基本上与注入电流成正比，而且电流的变化转换为光功率变换是线性的，所以通过注入电流来实现光强度调制。在模拟光纤通信系统中，模拟信号的调制是直接连续的模拟信号（如语音，电视信号）对光源进行调制。

图 4-1 是 LD 和 LED 模拟信号的调制原理，连续的模拟信号电流叠加在 LED 或 LD 直流偏置电流 I_b 上，使其直流偏置电流 I_b 工作点处于 LED 或 LD 的 $P-I$ 特性曲线的线性段的中点，可以减小光信号的非线性失真。

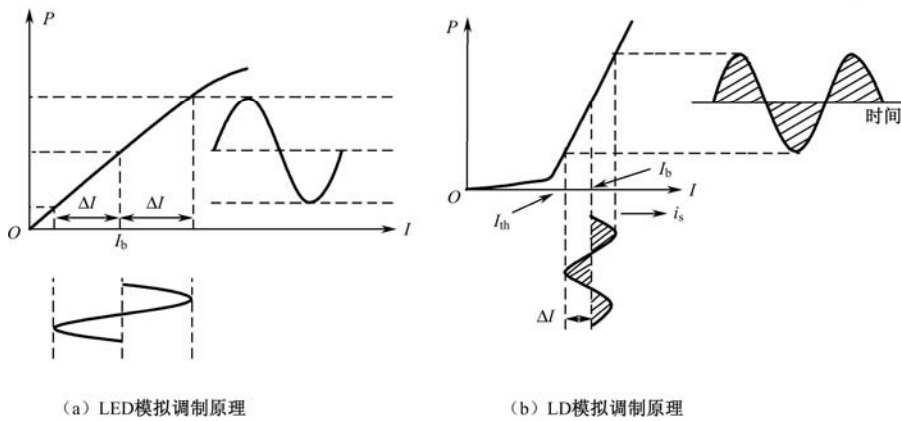


图 4-1 直接光强模拟调制原理

图 4-2 给出了一个用于 LED 或 LD 模拟调制的典型电路。这是共发射极跨导放大器，将输入三极管 VT 到基极的电压转换为 VT 的集电极电流。调整 VT 的基极电压使其工作在 A 类状态。且在 VT 的线性区。LED 或 LD 也被偏置于其线性区中点。当输入端电信号 U_{in} 增加，VT 的基极电压增加，随之基极电流增加，LED 或 LD 驱动电流（集电极电流）增加，根据调制特性输出光功率也就增加，反之减少。

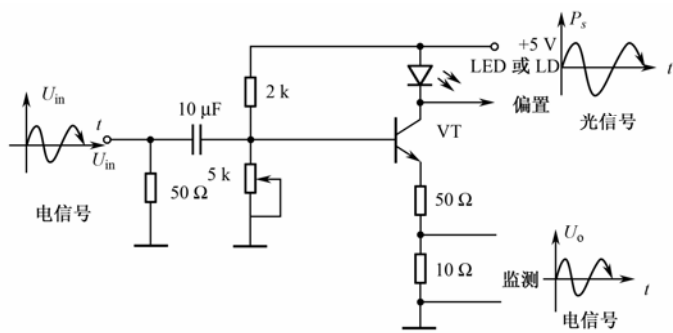


图 4-2 LED 或 LD 模拟调制电路

2. 光源的数字调制

图 4-3 所示为 LD 和 LED 进行数字信号调制的原理图，对 LD 施加了偏置电流 I_b 。由图可见，当激光器的驱动电流大于阈值电流 I_{th} 时，输出光功率 P 和驱动电流之间基本上是线性关系，输出光功率和输入电流成正比，所以输出光信号反映输入电信号。

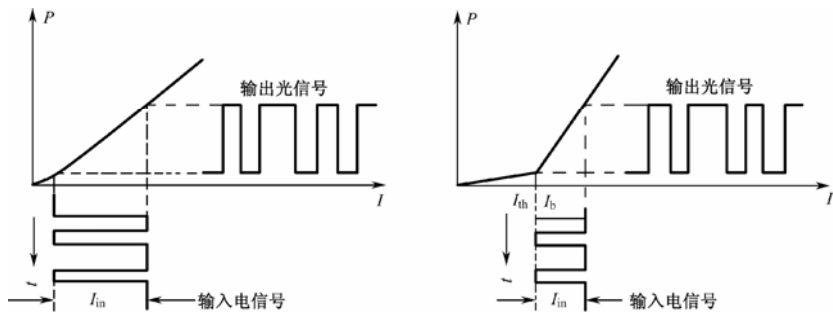


图 4-3 直接光强数字调制原理

4.2.2 光发射机的构成及原理

数字光发射机的基本组成如图 4-4 所示，主要有光源和电路两部分。光源是实现电/光转换的关键器件，电路的设计是以光源为依据，以 LD 为光源的电路通常有线路编码、调制电路、控制电路等部分；以 LED 为光源的光发射机中一般有线路编码、调制电路基本部分和补偿电路等构成。

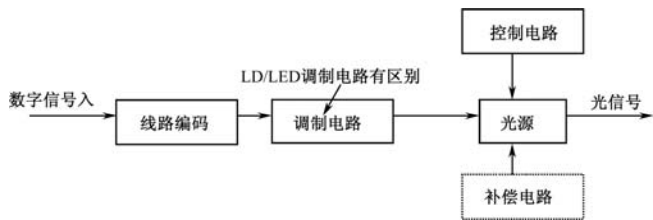


图 4-4 数字光发射机构成方框图

光发射机各部分的作用是：光源作为电导光器件，其作用是实现光电变换；线路编码

对输入信号码流结构进行某种变换,以适应光纤线路传输和不中断业务检测误码的要求;调制电路与光源一起把电信号调制成光信号;补偿电路对 LED 光源实施温度补偿,从而使输出光功率恒定;控制电路通常由自动温度控制(ATC),自动功率控制(APC)等控制电路构成,使输出光功率恒定。

1. 线路编码

在数字系统中,从电端机输出的是适合于电缆传输的双极性 HDB₃ 码。由于光源不可能发射负光脉冲,因此必须进行码型变换,以适应数字光纤通信系统传输的要求。数字光纤通信系统普遍采用二电平码,即“有光脉冲”表示“1”码,“无光脉冲”表示“0”码。适合于光纤通信的线路码型很多,根据不同情况对线路码型的要求有所侧重,最基本的要求有:

(1) 码型中应包含足够的定时信息。因而应尽可能减少连“1”码和连“0”码的数目,使“1”码和“0”码的分布均匀,保证定时信息丰富。

(2) 能实现在线(不中断业务)的误码检测,有利于长途通信系统的维护。

(3) 能限制信号带宽,减小功率谱中的高频和低频分量。这样就可以减小信号基线漂移,提高输出信号功率的稳定性和减小码间干扰,有利于提高光接收机的灵敏度。

(4) 能提供一定的冗余码,用于平衡码流、误码监测和公务通信。但对高速光纤通信系统,应适当控制冗余码,以免占用过大的带宽。

数字光纤通信系统常用的线路码型有:扰码、mBnB 码和插入码等,下面对它们进行简要介绍。

1) 扰码

为了保证传输的透明性,在光发射机的调制器前,需要附加一个扰码器,将原始的二进制码序列加以变换,使其接近于随机序列。相应地,在光接收机的判决器之后,附加一个解扰器,以恢复原始序列。扰码与解扰可由反馈移位寄存器和对应的前馈移位寄存器实现。扰码改变了“1”码与“0”码的分布,从而改善了码流的一些特性。但是,扰码仍具有下列缺点:

(1) 不能完全控制长串连“1”和长串连“0”序列的出现。

(2) 没有引入冗余,不能进行在线误码监测。

(3) 信号频谱中接近于直流的分量较大,不能解决基线漂移。

因为扰码不能完全满足光纤通信对线路码型的要求,所以许多光纤通信设备除采用扰码外还采用其他类型的线路编码。

2) mBnB 码

mBnB 码是把输入的二进制源码流进行分组,每组有 m 个二进制码,记为 mB ,称为一个码字,然后把一个码字变换为 n 个二进制码,记为 nB ,并在同一个时隙内输出。这种码型是把 mB 变换为 nB ,所以称为 mBnB 码,其中 m 和 n 都是正整数, $n > m$,一般取 $n=m+1$ 。mBnB 码有 1B2B, 3B4B, 5B6B, 8B10B, 17B18B 等。

由 mBnB 码编码原理可知,最简单的 mBnB 码是 1B2B 码,即曼彻斯特码,就是把原码的“0”变换为“01”,把“1”变换为“10”。因此最大的连“0”和连“1”的数目不会超

过两个，例如 1001 和 0110。但是在相同时隙内，传输 1 比特变为传输 2 比特，码速提高了 1 倍。

以 3B4B 码为例，输入的原始码流 3B 码，共有 $8(2^3)$ 个码字，变换为 4B 码时，共有 $16(2^4)$ 个码字，为保证信息的完整传输，必须从 4B 码的 16 个码字中挑选 8 个码字来代替 3B 码。设计者应根据最佳线路码特性的原则来选择码表。例如：在 3B 码中有 2 个“0”，变为 4B 码时补 1 个“1”；在 3B 码中有 2 个“1”，变为 4B 码时补 1 个“0”。而 000 用 0001 和 1110 交替使用；111 用 0111 和 1000 交替使用。同时，规定一些禁止使用的码字，称为禁字，例如 0000 和 1111。

mBnB 码是一种分组码，设计者可以根据传输特性的要求确定某种码表。*mBnB* 码的特点是：

- (1) 码流中“0”和“1”码的概率相等，连“0”和连“1”的数目较少，定时信息丰富。
- (2) 高低频分量较小，信号频谱特性较好，基线漂移小。
- (3) 在码流中引入一定的冗余码，便于在线误码检测。

mBnB 码的缺点是传输辅助信号比较困难，因此，在要求传输辅助信号或要求有一定数量的区间通信设备中，不宜用这种码型。

3) 插入比特码

插入码是把输入二进制原始码流分成每 *m* 比特一组，然后在每组 *mB* 码末尾按一定规律插入一个码，组成 *m*+1 个码为一组的线路码流。根据插入码的规律，可以分为 *mB1C* 码、*mB1H* 码和 *mB1P* 码。

mB1C 码的编码原理是：把原码流分成每 *m* 比特一组，然后在每组 *mB* 码的末尾插入 1 比特补码，这个补码为 *mB* 码组中第 *i* 位的反码，称为 C 码，所以称为 *mB1C* 码。补码插在 *mB* 码的末尾，连“0”码和连“1”码的数目最少。例如，设 C 码为 *mB* 码组中末尾位的反码，则有：

<i>mB</i> 码为	100	110	001	101
<i>mB1C</i> 码为	1001	1101	0010	1010

C 码的作用是引入冗余码，可以进行在线误码率监测，同时改善了“0”码和“1”码的分布，有利于定时提取。

mB1H 码由 *mB1C* 码演变而成的，在插入比特的位置，不是完全插入 C 码，而是交替插入 F 帧码，SC 公务码，M 检测码，D 数据码，I 区间通信码等形成混合插入 (Hybrid) 码的形式，因此变为 *mB1H* 码。

mB1H 码特点：利用冗余信息实现辅助信息的传送，可在不中断业务时误码检测，缺点是码流的频谱特性不如 *mBnB* 码。但在扰码后再进行 *mB1H* 变换，可以满足通信系统的要求。常用的 *mB1H* 码，有 1B1H 码、4B1H 码和 8B1H 码。

在 *mB1P* 码中，P 码称为奇/偶校验码，其作用和 C 码相似，但 P 码有以下两种情况。

- (1) P 码为奇校验码时，其插入规律是使 *m*+1 个码内“1”码的个数为奇数，例如：

<i>mB</i> 码为	100	000	001	110
<i>mB1P</i> 码为	1000	0001	0010	1101

当检测得 *m*+1 个码内“1”码为奇数时，则认为无误码。

- (2) P 码为偶校验码时，其插入规律是使 *m*+1 个码内“1”码的个数为偶数，例如：

<i>mB</i> 码为	100	000	001	110
--------------	-----	-----	-----	-----

mB1P 码为 1001 0000 0011 1100

当检测得 $m+1$ 个码内“1”码为偶数时,则认为无误码。

编码后码速提高 $M=(m+1)/m$ 倍,若编码前的码速率为 f_1 ,则编码后的码速率 $f_2=(m+1)f_1/m$,即 $f_2>f_1$;冗余度 $C=(f_2-f_1)/f_1$;最大同码数为 $B=(2m-j)+1, 1\leq j\leq m$,即 B 的范围为: $m+1\sim 2m$ 。

2. 光源调制电路

基于共发射极饱和开关驱动电路的 LED 数字调制电路如图 4-5 所示,当输入信号 U_{in} 为低电平“0”及高电平“1”时,晶体管 VT 分别处于截止和饱和导通状态,只有在饱和状态时,提供 LED 所需驱动电流,所以 LED 发光。 R_2 为限流电阻,调整 R_2 可以使 LED 工作于设计电流下。 C_1 为加速电容,用以提高电路的工作速度。 R_3 提供发光二极管小量的正向偏置电流,有利于 LED 高速应用。

图 4-6 所示为并联型调制电路(LED 与开关并联),其工作原理是,当输入信号 U_{in} 为低电平“0”时,VT 截止,电流经 R_1 到 LED 使其发光。当 U_{in} 为高电平“1”时,VT 饱和导通,则电流流经 VT 而不流经 LED。由于 VT 射极接低负电位,可使 LED 截止时有一小的反偏,以达到消除存储电荷的目的。肖特基二极管 D 用来限制反偏的深度。

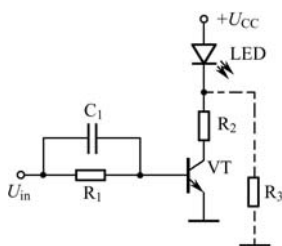


图 4-5 共发射极饱和开关调制电路

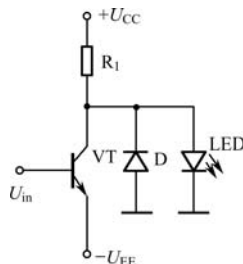


图 4-6 并联型电路

对于 LED 作为光源的调制电路,为了使输出光功率稳定,虽不需加控制电路,但适当的温度补偿电路还是需要的。发光二极管具有 $-1\%/^{\circ}\text{C}$ 的光功率负温度系数,在正常工作的温度 ($0\sim 40^{\circ}\text{C}$) 范围内可引起约 2 dB 的光输出功率变化。解决这个问题的办法是,在系统设计中留出 2 dB 的裕量;或是采用温度补偿。所谓温度补偿即当 LED 温度上升时增大 LED 的驱动电流,使其输出光功率维持不变或变化较小。一种补偿方法是利用具有负温度系数的热敏电阻代替图 4-5 中的 R_2 或图 4-6 中的 R_1 。这样当温度上升时,热敏电阻减小,使 LED 的驱动电流增大。

另一种温度补偿方法如图 4-7 所示。用几个硅 P-N 结二极管与电阻 R 和 LED 串联,利用硅 P-N 结两端压降约 $-2.5\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 的负温度系数起到补偿作用,补偿量可通过调整硅 P-N 结的个数来确定。如图 4-7 所示,当温度从 T_1 增高到 T_2 时,LED 驱动电流从 I_1 增大到 I_2 ,设 LED 的 P-N 结两端压降的负温度系数与硅 P-N 结相同约 $-2.5\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$,串联 n 个硅二极管作为温度变化补偿,保持 LED 光输出功率不变,则:

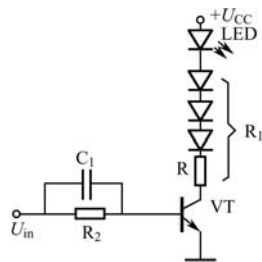


图 4-7 LED 温度补偿电路

$$\frac{I_2 - I_1}{T_2 - T_1} = \frac{(n + 1)2.5}{R}$$

例如 $T_2 - T_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，假设从对应 $P-I$ 曲线查出 $I_2 - I_1 = 10\text{ mA}$ ， $R = 20\text{ }\Omega$ ，则 $n = 3$ ，也就是只需串联 3 个硅二极管就可补偿 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度变化。

由于 LD 和 LED 的 $P-I$ 特性不同，因此驱动方式也不同。LD 的高速光发射机要比 LED 光发射机电路复杂得多，驱动电流选择，激光器控制等都对调制性能至关重要。

LD 驱动电路和偏置电流的选择应考虑：

(1) 加大直流偏置电流使其逼近阈值，即 $I_b \leq I_{th} = 0.9I_{th}$ 。这样可以大大减小电光延迟时间，同时使张弛振荡得到一定程度的抑制，减小码型效应和结发热效应的影响。LD 最大驱动电流应为 $I_{LD} = (1.2 \sim 1.5)I_{th}$ 。

(2) 加大直流偏置电流会使激光器的消光比恶化。所谓消光比，是指激光器在全“0”码时发射的功率与全“1”码时发射的功率之比，通常要求消光比 $< 10\%$ ，以免接收机的灵敏度受到影响。

驱动电路的作用就是提供恒定的 LD 偏流以及完成光调制，同时采用自动功率和温度控制电路使平均光功率保持恒定。图 4-8 为实际的 LD 驱动电路，其中， R_b 、 L 构成 LD 的预偏置电路提供 LD 的 I_b 电流； VT_1 、 VT_2 组成非饱和式电流开关，工作在放大区； VT_3 、 VT_5 、 VT_4 、 VT_6 组成电平移动电路，各移动 1.4 V ； V_{BB} 为参考电压值， V_{BB} 的值应根据输入脉冲电平值来确定，即 $V_{BB} = (U_H + U_L)/2$ ；与非门输出为“1”时，对应 -0.8 V ，输出为“0”时，对应 -1.8 V 。

V_{B1} 表示 VT_1 的基极电压， V_{B2} 表示 VT_2 的基极电压，当输入信号 U_{in} 为“1”时， $V_A = -1.8\text{ V}$ ， $V_{B1} = -1.8 - 1.4 = -3.2\text{ V}$ ， $V_{B2} = -1.3 - 1.4 = -2.7\text{ V}$ ，则 $V_{B2} > V_{B1}$ ， VT_2 抢先导通，使 $V_E = -3.4\text{ V}$ ，则 VT_1 截止，此时由 VT_2 和电流源提供 LD 的 ΔI 电流，使 LD 发光；当输入信号 U_{in} 为“0”时， $V_A = -0.8\text{ V}$ ， $V_{B1} = -2.2\text{ V}$ ， $V_{B2} = -1.3 - 1.4 = -2.7\text{ V}$ ，则 $V_{B1} > V_{B2}$ ， VT_1 抢先导通，使 $V_E = -3.4\text{ V}$ ，则 VT_2 截止，这时，电流经 VT_1 和电流源，而不经 VT_2 ，故 LD 不发光。

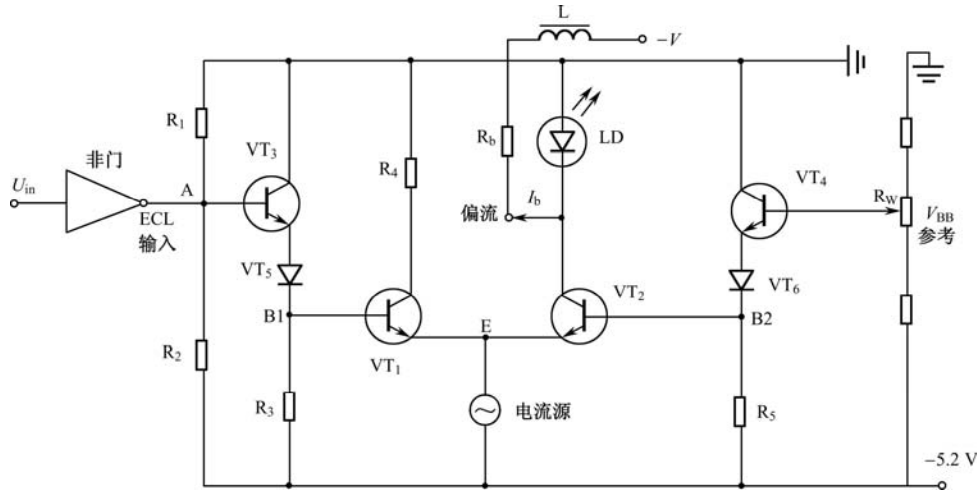


图 4-8 LD 驱动电路

在实用光发射机中，为了保证有稳定可靠的输出光功率以及使用、维护方便等，往往

要求有各种控制电路，如 APC 电路，ATC 电路和保护电路等。

3. 自动温度控制电路（ATC）

半导体激光器是理想的高速调制光源，但其对温度变化很敏感，要激光器输出稳定的光信号必须控制其温度变化。温度的变化和器件的老化给激光器带来不稳定性，主要表现为：激光器的阈值电流随温度呈指数规律变化，从而使输出光功率发生很大的变化，如图 4-9 所示。尤其是长波长激光器，不设法稳定其输出光功率，难以实用化。

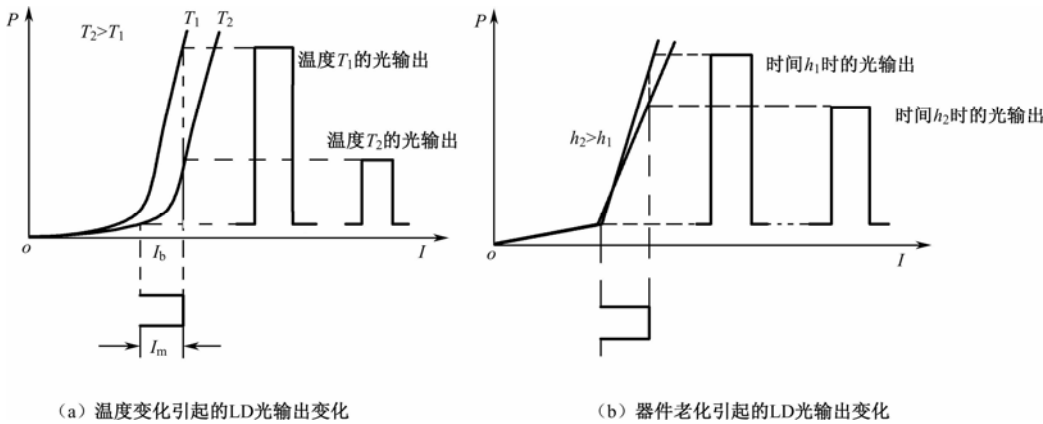


图 4-9 温度变化及器件老化引起的 LD 光输出变化

研究表明，随着温度的升高 ($T_2 > T_1$) 和器件的老化 ($h_2 > h_1$)，激光器的外微分子效率降低，从而使输出光信号变弱；随着温度的升高，半导体激光器的发射波长的峰值位置移向长波，例如，GaAs 材料的 LD 温度系数为 2.5 A/K。控制电路的作用就是消除温度变化和器件老化的影响，稳定输出光信号。目前国内外主要采用的稳定方法是采用 ATC 和 APC 电路。

温度控制由微型半导体致冷器、热敏电阻以及控制电路组成，其原理如图 4-10 所示，热敏电阻监测激光器的结温，与设定的基准温度比较、放大后，驱动致冷器的控制电路工作，产生致冷效果，从而保持激光器在恒定的温度下工作。

微型半导体致冷器是基于半导体材料的帕尔帖效应制成的。所谓帕尔帖效应是指当直流电流通过两种半导体（P 型和 N 型）组成的电偶时，其一端吸热而另一端放热的效应。一对电偶的致冷量很小，可根据用途不同，将若干对电偶串联或并联，组成温差功能器，其中微型半导体致冷器的控制温差可达 30~40℃。为提高致冷效率和控制精度，常将致冷器和热敏电阻封装在激光器管壳内部，让致冷器直接与激光器的热沉接触，通过控制致冷器的电流就可以控制光源的工作温度，从而使激光器有较恒定的输出光功率和发射波长。

图 4-11 所示为一种 LD 温度控制电路。LD 的热沉、热敏电阻 R_T 与致冷器（TEC）冷面靠在一起，热敏电阻 R_T 接在电桥的一个臂上。在设定的温度下，电桥的状态应使致冷器电流为某一恒定值。设电阻 R_T 具有负温度系数，则当光源温度升高时， R_T 变小，比较放大器 A 的输出电压升高，使驱动致冷器的电流增大，于是致冷器冷面温度降低，使光源温度同时下降。

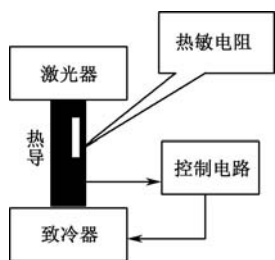


图 4-10 LD 温度控制方框图

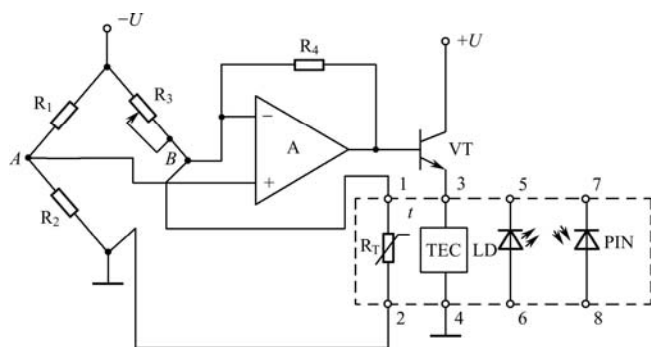


图 4-11 LD 温度控制电路

4. 自动功率控制电路（APC）

如上所述，激光器的输出光功率与温度变化和老化效应有关。温度控制只能控制温度变化引起的输出光功率的变化，而不能解决老化引起的输出光功率的下降。为了进一步稳定输出光功率，除了采取温度控制措施外，一般还采取自动功率控制（APC）。其中比较常用的自动功率控制方法有两种，一种是通过光反馈来自动调整偏置电流的自动偏置控制法，另一种是峰值功率/平均功率控制法。图 4-12 所示为自动功率控制电路，从 LD 背向输出的光功率，经 PIN 管监测出的光电流由 A_1 放大器放大，送至比较放大器 A_3 的反向输入端；另一方面，输入的数字信号与直流稳压电源中取出的直流参考信号经 A_2 比较放大器，送往 A_3 的同相输入端； $-U$ ， VT_3 和 R_5 组成直流电路向激光器提供调整偏置电流 I_b ，调节 $-U$ 可以实现人工调节偏流 I_b ，其中引入输入信号的反作为信号参考电压是防止 APC 电路在无输入信号或长连“0”码流时，偏流自动上升。当输入信号为长连“0”时，LD 发出光功率最少。因为有了信号参考，在长连“0”时， A_1 、 A_2 放大器输出电压同时降低，但其差值不变，这样 APC 电路就不会加大 I_b ，保证了驱动电路的正常工作。只有当 LD 由于温度的变化或老化而引起输出光功率的降低时， A_1 放大器输出电压降低， I_b 自动上升，使 LD 的输出光功率自动升高，起到自动功率控制作用。在一般情况下，反馈光为 LD 的背向光，其光功率大小与正向光有所不同，但它们的温度和老化特性却是相同的。因而，这种自动偏置控制的方法是稳定 LD 输出的一个有效方法。峰值功率/平均功率控制法较为复杂，这里就不介绍了。

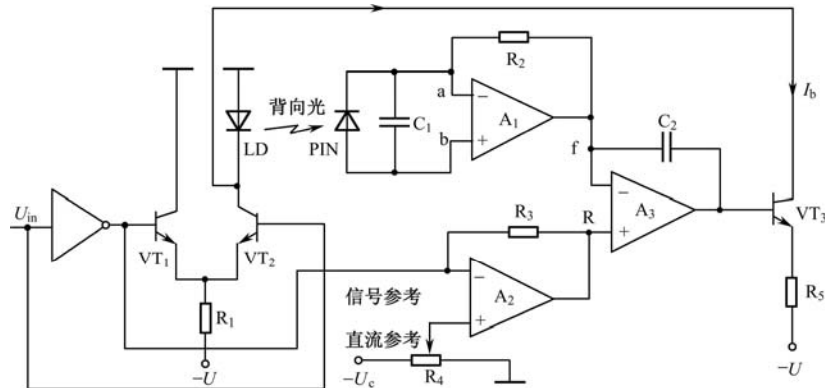


图 4-12 自动功率控制电路

5. LD过流保护电路

光源是光发射机的核心器件，它价格昂贵又较容易损坏。光源既要求在一定的温度范围内工作，又要求在一定的电流范围内工作，结温过高或电流过大都不能使光源正常工作，轻则减少光源的寿命，重则使激光器损坏，因此必须加保护措施。下面介绍光源的过流保护过程。

为了使光源不至于因接通电源瞬间冲击电流过大而被损坏，一般需要对激光器偏流实现慢启动和限流保护。图 4-13 所示是激光器缓启动过流保护电路，图中 VT_1 为激光器提供偏流 I_b ，过流保护电路由 VT_2 和 R_1 组成， R_2C_1 组成时延低通滤波器。

正常情况下，电阻 R_1 上电压小于 VT_2 的导通电压降，因此 VT_2 截止，过流保护电路不工作。当偏流 I_b 过大，致使 R_1 上电压剧增并超过 VT_2 导通电压降时， VT_2 饱和导通，使 $V_{C1} \approx 0$ ，从而导致 VT_1 截止，保护了激光器不至因偏流 I_b 过大而被损坏。

R_2C_1 组成 ($1 \sim 10\text{ms}$) 时延低通滤波器 (LPF)，在接电源后起缓启动作用，其目的保护 LD 免受冲击。电路充电时间 $\tau = 1/(R_2C_1)$ ，在接通电源瞬间， V_{C1} 不能突变，即 $V_{C1} = 0$ ，相当于接地，此时，通过 LD 的电流 $I_b \approx 0$ ，随着对 C_1 充电， $V_{C1} = -U + I_{e1} \times R_2$ ， V_{C1} 点电位逐渐降低， I_b 逐渐增加直至 VT_2 截止为止。LD 工作之前，使偏流 I_b 缓慢启动，避免了电流的瞬态过冲。

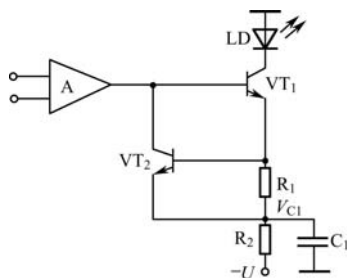


图 4-13 LD 的缓启动过流保护电路

4.2.3 光发射机的主要性能指标

1. 输出光功率及其稳定性

光发射机的输出光功率，实际上是从其尾纤的出射端测得的光功率，因此应称为出纤光功率。光功率的单位有时用绝对电平 dBm 表示，即：

$$P_s = 10 \lg \frac{p_s(\text{mw})}{1(\text{mw})}$$

光发射机的输出光功率大小，直接影响系统的中继距离，是进行光纤通信系统设计时不可缺少的一个重要参数。输出光功率的稳定性要求是指在环境温度变化或器件老化过程中，输出光功率要保持恒定，如稳定性为 $5\% \sim 10\%$ 。

2. 消光比EXT

消光比是指发全“0”码时的输出光功率 P_0 和发全“1”码时输出光功率 P_1 之比，即：

$$\text{EXT} = \frac{P_0}{P_1}$$

消光比有两种意义：一是反映光发射机的调制状态，消光比值太大，表明光发射机调制不完善，电光转换效率低；二是影响接收机的接收灵敏度，一部性能满足指标的数字光

发射机，其消光比的值应为 $EXT \leq 10\%$ 。

4.3 光接收机

光发射机发射的光信号，在光纤中传输时，不仅幅度被衰减，而且脉冲的波形被展宽。光接收机的作用，是探测经过传输的微弱光信号，并放大、再生成原传输的信号。

4.3.1 光接收机的结构及原理

在 IM-DD 光纤通信系统中，光接收机的主要构成如图 4-14 所示。

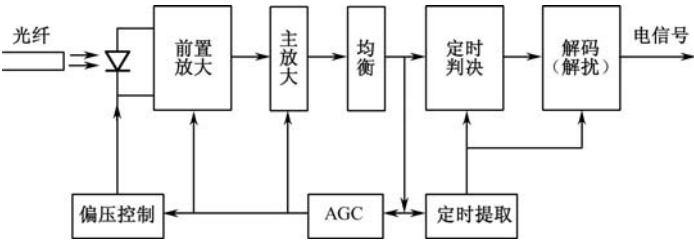


图 4-14 DD 数字光接收机框图

在光接收机中，首先需要将光信号转换成电信号，即对光进行解调，这个过程是由光电检测器（PIN 或 APD）来完成的。光电检测器把光信号转换成电流信号送入前置放大器。前置放大器的噪声对整个放大器的输出噪声影响甚大，因此，它应该是精心设计和制作的低噪声放大器。主放大器的作用除提供足够的增益外，它的增益还受自动增益控制（AGC）电路控制，使其输出信号的幅度在一定的范围内不受输入信号幅度的影响。均衡将信号均衡成升余弦波，消除码间干扰并减小噪声影响以利判决。判决器在定时提取电路提供的与发端同步的时钟控制下，把经均衡后的波形判决再生为原来的波形。如果在发射端进行了线路编码（或扰乱），那么在接收端需要有相应的译码（或解扰）电路。另外偏压控制电路主要针对 APD 管偏压大约为 $-50 \sim -200\text{ V}$ ，需用变换器将低压变成高压。若用 PIN 管，因其需要的偏压约为 $-10 \sim -20\text{ V}$ ，可不用偏压控制电路。

光接收机最主要的性能指标是灵敏度。在接收机的实现中，中心的问题也是如何降低输入端的噪声、提高接收机灵敏度。灵敏度主要取决于光电检测器的响应度以及检测器和放大器引入的噪声。因此，噪声的分析和灵敏度的计算也是本章要讨论的主要问题。

1. 光检测器的偏置电路

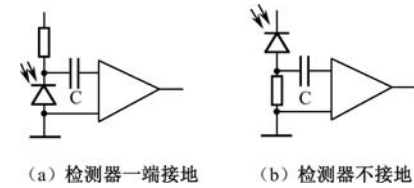


图 4-15 检测器偏置电路

光检测器是实现光/电转换的关键器件。检测器的偏置电路一般有如图 4-15 所示两种。图 4-15 (a) 电路的优点是，检测器一端接地，如果检测器的外壳和这一端子是连通的，则检测器有接地外壳屏蔽，不易受到干扰。但图 4-15 (b) 的电路却不能，除非采用具

有外壳单独接地引线的检测器件。图 4-15 (a) 在 APD 作为检测器的情况下, 要求耦合电容 C 具有极其良好的绝缘性, 因为 APD 两端有 $-50\sim-200\text{ V}$ 的电压, 如有少量漏电会使前置放大器工作点漂移, 严重时损坏输入级。图 4-15 (b) 的电路没有这种缺点。

2. 前置放大器

前置放大器将光检测器转换的微弱光信号放大到一定程度, 以便获得最高信噪比。前置放大器直接影响接收机灵敏度, 对整个放大器的输出噪声影响甚大, 因此, 前置放大器着重于低噪声和高信噪比, 输出电压为 mV 量级。前置放大器通常有三种类型。

1) 低阻型前置放大器

用普通晶体管作为前置放大器, 如图 4-16 (a) 所示。其特点是电路简单, 输入阻抗低, 电路的噪声较大, 输入电路的时间常数 RC 小于信号脉冲宽度 τ , 易防止产生码间干扰。因此, 这种接收机不需要或只需很少的均衡, 前置级的动态范围也较大, 放大器的频带宽, 适用于高速率传输系统。

2) 高阻型前置放大器

用场效应管 (FET) 作为前置放大器, 如图 4-16 (b) 所示。其设计应尽量加大偏置电阻, 把噪声减到尽可能小, 因此, 其特点是噪声小。高阻型前置放大器不仅动态范围小, 而且当比特速率高时, 由于输入电路的时间常数太大, 即 $RC > \tau$, 脉冲沿很长, 码间干扰严重, 因而对均衡电路要求较高, 一般只在码速率较低的系统中使用。

3) 互 (跨) 阻型前置放大器

互阻型 (也称跨阻型) 前置放大器实际上是电压并联负反馈放大器, 如图 4-16 (c) 所示。由于负反馈改善了放大器的带宽和非线性, 因此是一个性能优良的电流—电压转换器, 具有频带宽、噪声低等优点, 而且它的动态范围也比高阻型前置放大器有很大改善, 在光纤通信中得到广泛应用。

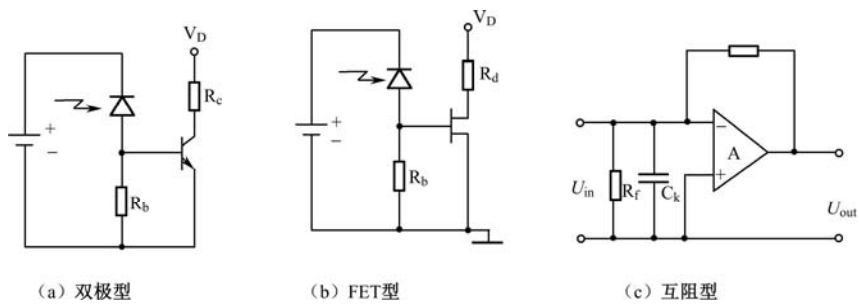


图 4-16 光接收机的前置放大器

3. 主放大器与自动增益控制AGC电路

主放大器通常由运算放大器、负反馈放大器、温度补偿电路, 以及射极输出器构成。其功能着重高增益, 并将前置放大器输出信号放大到适合判决电路所需要的信号电平。

AGC 电路控制主放大器的增益, 让接收机有一定的动态范围, 使输出的信号幅度在一定范围内不受输入信号幅度的影响, 输出电压为 $1\sim3\text{ V}$ 。

图 4-17 给出了包括自动增益控制和 APD 的雪崩增益的自动控制主放大器。主放大器的

输出信号，经过峰值检波和 AGC 放大后，得到一个与主放输出信号的幅度成比例的直流信号，然后用此信号控制主放大器的增益和 APD 的偏置电压。

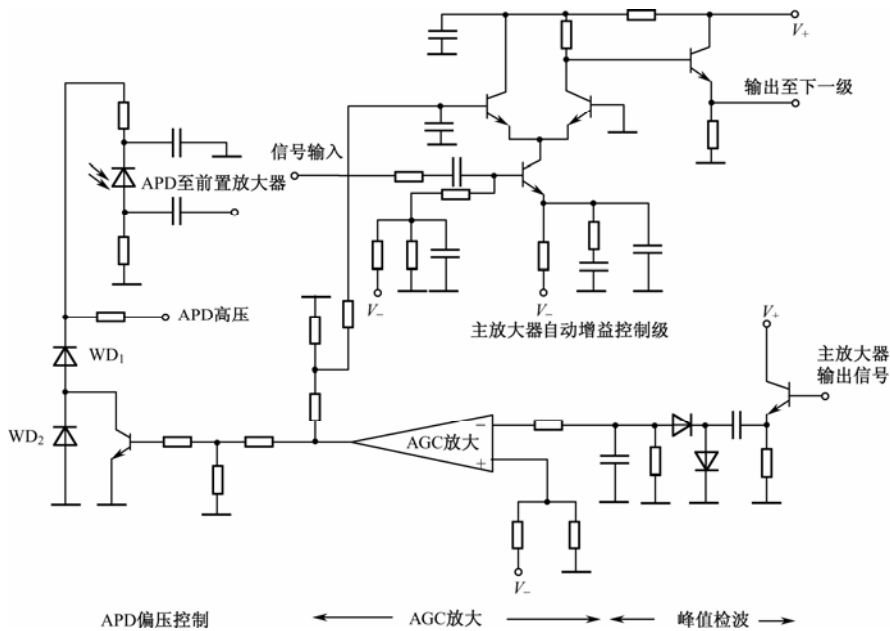


图 4-17 光接收机主放大器及 AGC 电路实例

4. 均衡与定时判决

光信号脉冲通过光纤传输后，由于光纤线路色散和光接收机的带宽影响，接收机输出的信号波形将产生上升缓慢、下降拖尾较长的失真，使前后码元在波形上互相重叠而产生码间干扰，引起波形失真，造成误码，影响接收机灵敏度。因此，必须对放大后的脉冲进行均衡，对失真的波形进行补偿，以便于后续的判决，减少码间干扰的影响。

均衡电路不可能将波形全部恢复原样，而是进行适当的修正，形成判决电路容易识别的波形。均衡电路可把接收信号变换成升余弦滚降波形，尽管还有拖尾，但在所有判决时刻，拖尾都为零点，因此，任一码元不会影响它前后码元取样点的值，不会产生码间干扰。

图 4-18（a）为滚降滤波器形成的波形 $h(T)$ ，它具有的特性为：

$$h(0)=1, h(nT)=0 (n=\pm1, \pm2, \pm3, \cdots)$$

图 4-18（b）和图 4-18（c）为两种均衡电路实例，根据码速选择好元件值后，还要进行微调，使码间干扰最小。

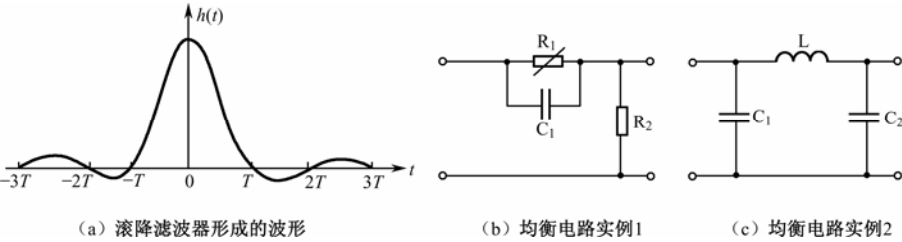


图 4-18 均衡电路及特性

定时判决（再生）电路包括判决电路和时钟提取电路，其功能是把放大器输出的升余弦波形恢复成数字信号。

定时判决电路为了判定每一比特是“0”还是“1”，首先要确定判决的时刻，这就需要从升余弦波形中提取准确的时钟信号。时钟信号经过适当的移相后，在最佳的取样时间对升余弦波形进行取样，然后将取样幅度与判决阈值进行比较，确定码元是“0”还是“1”，从而把升余弦波形恢复再生成原传输的数字信号。理想的判决电路应是带有选通输入的比较器，比较电压设定在最佳的判决电平上，时钟信号由选通端输入，从而确定最佳的判决时间。最佳的判决时间应是升余弦波形的正负峰值点，这时取样幅度最大，抗噪声的能力最强。

定时判决电路中的重要部分是时钟提取电路。时钟提取电路不仅应该稳定可靠、抗连“0”或连“1”性能好，而且应尽量减小时钟信号的抖动。时钟的抖动使取样偏离最佳的时间，增加误码率。尤其是在多中继器的长途通信系统中，时钟抖动在中继器中的积累会给系统带来严重的危害，所以抖动也是光纤数字通信系统的重要性能指标。

4.3.2 光接收机的噪声分析

光接收机中存在各种噪声源，根据噪声产生的不同机理，噪声可分为两类：散粒噪声和热噪声。接收机中的噪声源及其引入部位如图 4-19 所示，其中散粒噪声包括光检测器的量子噪声、暗电流噪声、漏电流噪声和 APD 倍增噪声；热噪声主要指负载电阻和导线产生的热噪声，而放大器噪声（主要是前置放大器噪声）中，既有热噪声，又有散粒噪声。

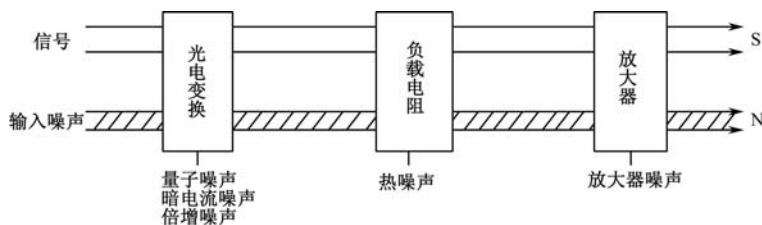


图 4-19 接收机噪声及其分布

光接收机的各种噪声及产生原因如下：

（1）输入噪声是随信号而来的，这种噪声是由光发射机和传输过程中产生的，例如发射机的消光比和传输码间干扰的影响等。

（2）光检测器量子噪声是由光检测器接收到光信号、光子激发出电子的随机过程引起的噪声。

（3）光检测器在没有入射光照射时，仍会有一定的电流输出，这种电流称为暗电流。光检测器的暗电流噪声是由于暗电流的影响产生的一种散粒噪声。

（4）APD 管倍增噪声是由 APD 管的倍增过程产生的噪声。

（5）光检测器的漏电流噪声是由光检测器表面物理状态不完善引起漏电流产生的噪声。

（6）负载电阻热噪声是由负载电阻及导线的热损耗引起的噪声。

（7）放大器噪声是由放大器本身引起的噪声。

1. 光检测器噪声定量分析

1) 散粒噪声

设入射到光检测器（如 PIN 管）的光敏面上恒定的光功率为 P 。不论光功率如何恒定，由于光量子在 PIN 管内激励出的电子数是随机的，所以输出电流仍带有随机的散粒噪声。

可以证明，光检测器散粒噪声的统计特性服从泊松分布。PIN 管输出的散粒噪声近似白噪声，其双边功率谱为：

$$n_s = e_0 I_p$$

式中， I_p 为光电流； e_0 为电子电荷。对于带宽为 B 的系统，PIN 管的散粒噪声功率为：

$$N_s = \int_{-B}^B e_0 I_p df = 2e_0 I_p B$$

2) APD 的倍增噪声

设恒定的光功率照射在 APD 的光敏面上，除了光量子激励的一次电子有随机性之外，由于一次电子碰撞电离产生的二次倍增电子也是随机的，即倍增因子 G 也是随机的。因此，APD 输出的光电流带有噪声，称为倍增噪声。

倍增噪声的统计特性非常复杂，不是泊松或高斯分布，其噪声功率谱密度可表示为：

$$n_g = e_0 I_p \langle G^2 \rangle$$

式中 $\langle G^2 \rangle$ 是 G 的二阶矩（即 G^2 的统计平均）。

为了分析方便，可以采用近似式：

$$\langle G^2 \rangle \approx \langle G \rangle^2 F(G) \approx \langle G \rangle^{2+x}$$

式中， $\langle G \rangle$ 为平均倍增因子； x 为过剩噪声指数，Si 的 $x=0.3\sim 0.5$ ，Ge 的 $x=0.6\sim 1.0$ ； $F(G) \approx G^x$ 为过剩噪声系数。于是 APD 倍增噪声功率谱密度为：

$$n_g = e_0 I_p \langle G \rangle^{2+x}$$

对带宽为 B 的系统，APD 输出的倍增噪声功率为：

$$N_g = \int_{-B}^B e_0 I_p \langle G \rangle^{2+x} df = 2e_0 I_p \langle G \rangle^{2+x} B$$

3) 检测器的暗电流噪声

检测器加上偏压后，或多或少要产生一些暗电流，暗电流也会引起散粒噪声。在无倍增情况下，对带宽为 B 的系统，暗电流 I_d 引起的检测器输出散粒噪声功率为：

$$N_d = 2e_0 I_d B$$

对带宽为 B 的系统，在 APD 内暗电流也会引起倍增噪声，其噪声功率为：

$$N_d = 2e_0 I_d \langle G \rangle^{2+x} B$$

2. 放大器噪声定量分析

为了计算光接收机的噪声，考虑如图 4-20 (a) 所示光接收机电路，其等效电路如图 4-20 (b) 所示。图中 i_s 是检测器等效电流源、 $i_n(t)$ 表示它的散粒噪声、 C_d 是它的结电容、 R_b 是偏置电阻（无噪声电阻）、 i_b 是偏置电阻等效噪声电流源、 C_s 是偏置电路杂散电容、 R_a 和 C_a 是放大器输入电阻和输入电容、 i_a 是放大器输入端的并联等效噪声电流源、 e_a 是放大器输入端的串联等效噪声电压源、其余部分均为无噪声网络。放大器被分解为理想的放大器和等

效噪声电压源 $\langle V^2 \rangle$ 和电流源 $\langle I^2 \rangle$ ，其相应的功率谱密度分别表示为 S_E 和 S_I 。

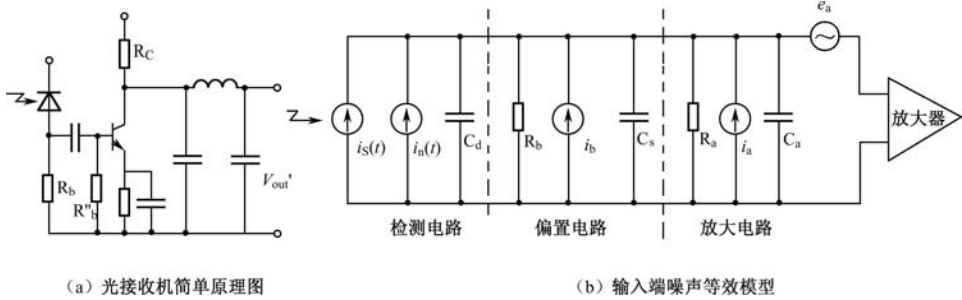


图 4-20 光接收机的等效模型

求噪声功率的步骤如下所述：

- (1) 求单位频谱上的噪声功率（在 $1\ \Omega$ 电阻条件下）： $S_E = dV^2(t)/df$ ；或 $S_I = dI^2(t)/df$ 。
- (2) 求噪声功率： $N_A = \int_{f_1}^{f_2} S_E df$ ； $f_2 - f_1$ 为系统的通频带。

放大器噪声特性取决于所采用的前置放大器类型，根据放大器噪声等效电路和晶体管理论可以计算。常用三种类型前置放大器（见图 4-16）的输出的等效噪声功率 N_A 分别计算如下。

1) 双极晶体管 (BJT) 前置放大器输出噪声功率

根据晶体管理论，BJT 噪声源的噪声功率近似为：

$$S_I = e_0 I_b = \frac{e_0 I_c}{\beta}, \quad S_E = \frac{(kT)^2}{e_0 I_c}, \quad \text{则}$$

$$N_A = 2 \left[\frac{2kT}{R_b} + \frac{e_0 I_c}{\beta} + \frac{(kT)^2}{R_t I_c} \right] A^2 B + \frac{2}{3} \frac{(kT)^2 (2\pi C_t)^2}{e_0 I_c} A^2 B^2 \quad (4.1)$$

2) 场效应管 (EFT) 前置放大器输出噪声功率

根据晶体管理论，EFT 噪声电压源的噪声功率近似为：

$S_I \approx 0$, $R_a \rightarrow \infty$, $S_E = 4kT/3g_m \approx 1.4kT/g_m$ ，则

$$N_A = \left[\frac{4kT}{R_b} + \frac{2.8kT}{g_m R_b^2} \right] A^2 B + \frac{2.8kT (2\pi C_t)^2}{3g_m} A^2 B^3 \quad (4.2)$$

3) 互阻抗—场效应管前置放大器的输出噪声功率为：

$$N_A = \left[\frac{4kT}{R_f} + \frac{2.8kT}{g_m R_f^2} \right] A^2 B + \frac{2.8kT (2\pi C_t)^2}{3g_m} A^2 B^3 \quad (4.3)$$

式中， A 为接收机的放大倍数； B 为放大器带宽； g_m 为 FET 跨导； I_c 为 BJT 集电极电流； β 为晶体管电流放大系数； e_0 为电子电荷； k 为波尔兹曼常数； T 为热力学温度； R_b 是偏置电阻； R_f 是负反馈电阻； R_t 是 R_b 与放大器输入电阻的并联； $R_t = R_b // R_a$ ， $C_t = C_d // C_a // C_s$ 。

4.3.3 光接收机的主要性能指标

1. 接收灵敏度 P_r

数字光接收机灵敏度的定义为：在保证给定的误码率 BER（如 10^{-9} ）或信噪比的条件

下，最小接收信号光功率 P_r 。

P_r 越小（也称为灵敏度高），意味着数字光接收机接收微弱信号的能力越强。灵敏度越高，此时当光发射机输出功率一定时，保证通信质量（满足一定误码率的要求）的中继通信距离就越长。因此，提高数字光接收机的灵敏度，可以延长光纤通信的中继距离和增加通信容量。

光接收机灵敏度是以一定误码率为条件的，这里先对误码产生和误码率概念进行介绍。接收机的误码由其总噪声引起，误码的多少及分布不仅与总噪声的大小有关，还与总噪声分布有关。光接收机对码元误判，即接收“0”码误判为“1”码，或把“1”码误判为“0”码的概率称为误码率（BER），其定义为：在一定的时间内，传输的总码流中误判的码元数和接收的总码元数的比值。

一般“0”码和“1”码的误码率是不相等的，但对于“0”码和“1”码等概率出现的码流，可认为是相等的，此时误码率可能达到最小，误码率近似为：

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^\infty \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] dx = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-Q^2/2}}{Q} \tag{4.4}$$

式中， Q 为信噪比参数，BER 与 Q 关系曲线如图 4-21 所示。由此可见只要知道 Q 值，就可由式（4.4）算出或由图 4-21 查出误码率，例如： $Q=6$ ， $BER=10^{-9}$ ， $Q=7$ ， $BER=10^{-12}$ 。

数字光接收机的灵敏度是在保证给定误码率条件下，光接收机接收微弱光信号的能力。它可用以下三种物理量来表征：

- （1）最低平均接收光功率 P_r ；
- （2）每个光脉冲的最低平均接收光子数 n_0 ；
- （3）每个光脉冲的最低平均能量 E_d 。

以上三种表示形式虽有不同，但本质上是一致的。对于“1”，“0”码等概率出现的 NRZ 码，三者之间的关系为

$$P_r = \frac{E_d}{2T_b} = \frac{n_0 hf}{2T_b}$$

式中， T_b 为脉冲码元周期， $T_b=1/f_b$ ， f_b 为传输速率； hf 为一个光子能量； P_r 的单位为 W 或 mW。

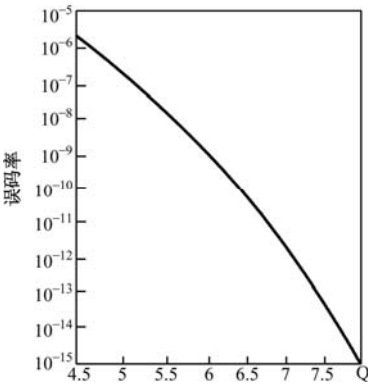


图 4-21 误码率和 Q 的关系

光接收机灵敏度的计算方法很多,其中 Personick 方法最适合工程应用。ITU-T 以 Personick 方法为基础略加改进,推荐采用。

1) PIN 光接收机灵敏度 P_r

$$P_r = \frac{E_d}{2T_b} = \frac{Q\sqrt{N}}{R_0 T_b} = \frac{Q\sqrt{N} h c f_b}{e_0 \eta \lambda} \quad (4.5)$$

式中, R_0 是 PIN 管的响应度,且 $R_0 = e\eta/hf$, η 为 PIN 量子效率; Q 为信噪比参数与 BER 有关,反映接收机信噪比; N 是光接收机各种前置放大器的输出的噪声功率。

由式 (4.5) 得知, PIN 光接收机灵敏度受入射光波长、接收机信噪比、噪声、传输速率、检测器的量子效率影响。

设 PIN 光接收机的工作参数如下: 光波长 $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$, 传输速率 $f_b = 8.448 \text{ Mb/s}$, 光电二极管响应度 $R_0 = 0.4 \text{ A/W}$, 互阻抗前置放大器 (FET) 的 $N = 10^{-18} \text{ A}^2$ 。要求误码率 $P_e = 10^{-9}$, 即 $Q = 6$, 由式 (4.5) 计算得到 $P_r = 1.5 \times 10^{-8} \text{ W} = -48.2 \text{ dBm}$ 。

2) APD 光接收机灵敏度 P_r

APD 光接收机灵敏度 P_r 计算比 PIN 复杂得多。主要是由于它的倍增噪声取决于光信号的强弱以及倍增因子 G 。这意味着“0”和“1”码倍增噪声的大小不一样,有码间干扰和无码间干扰不一样。若选用小的倍增因子,增益太小;选用大的倍增因子,倍增噪声太大,即存在一个最佳倍增因子 G_{opt} ,使信噪比最佳,接收机灵敏度最优。经推导可得:

$$G_{\text{opt}} = \left[\frac{2\sqrt{N}}{e_0 Q x f_b} \right]^{1/(1+x)}$$

$$P_r = \frac{E_d}{2T_b} = \frac{Q\sqrt{N}}{R_0 G_{\text{opt}}} + \frac{e_0 f_b Q^2 G_{\text{opt}}^{x+1}}{2R_0} \quad (4.6)$$

式 (4.6) 为有名的 Goell 公式。式中 x 为过剩噪声指数,估算时可取 $x = 0.5$ 。

2. 动态范围 D_{max}

在实际的系统中,由于中继距离、光纤损耗、连接器及熔接头损耗的不同,发送功率随温度的变化及器件老化等因素而变化,接收光功率有一定的范围。光接收机的动态范围定义为在保证给定的误码率 BER (如 10^{-9}) 或信噪比的条件下,允许的最大平均接收光功率 (单位 dBm) 和所需的最小平均接收光功率 (单位 dBm) 之差,其单位为 dB,即:

$$D_{\text{max}} = P_{\text{max}} - P_r$$

宽的动态范围对系统结构来说更方便灵活,实际设备在 20 dB 以上。

4.4 光中继器

光发送机输出的光脉冲信号,经过光纤传输后,因光纤的吸收和散射而产生衰减,又因光纤材料和结构上的色散,导致信号脉冲的失真。从而使传输线路的噪声、系统误码率增加,且失真程度随距离增加而加剧。因此,为了补偿光信号的衰减,对波形失真的脉冲进行整形,为延长光纤通信距离,必须在传输线路中每隔一定距离设置一个光中继机。若只考虑光纤对信号的损耗,可采用 EDFA 光纤放大器,补偿光信号的衰减。这里只介绍光

一电—光转换方式的光中继机，EDFA 光纤放大器的放大原理见第 3.3 节。

光中继机的组成如图 4-22 所示，包括光接收、再生判决和光发送部分。首先由光检测器将衰减和失真的光脉冲信号转换成电信号，通过放大、再生恢复出原来的数字信号，再对光源进行驱动调制，又产生光信号送入光纤以延长传输距离。

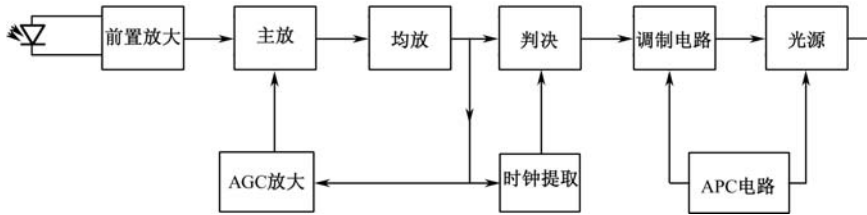


图 4-22 数字光中继器的方框图

在数字光纤通信系统中，一般根据光纤损耗和带宽的限制来估算中继距离，每隔 50~70 km 就要设置一个中继器，设置的中继器有无人站和有人站之分，它们的主要区别是有人站一般具有监测、公务、远供及区间通信等功能，而无人站一般只有供电功能。

4.5 系统的性能指标

4.5.1 系统的参考模型

数字光纤通信系统作为通信网中的传输部分，其传输性能的好坏直接影响全网、全程的通信质量，所以要考察光纤通信系统的传输性能，就应把它放在整个通信网中考虑，为了有机地分析整个通信网性能，ITU-T 在 G.801 建议中提出了“系统参考模型”的概念，并规定了系统参考模型的性能参数及指标。

数字系统参考模型有三种假设形式：假设参考数字连接、假设参考数字链路及假设参考数字段。而对于目前广泛应用的 SDH 传输系统，只将“假设参考数字连接”改为“假设参考数字通道（HRP）”来分配系统的性能指标，然后直接考核复用段、再生段的性能。

1. 假设参考数字连接（HRX）

假设参考数字连接是为研究通信网总的性能和指标分配而假设的通信距离最长、结构最复杂、传输质量最差的连接。如果在这种连接下的传输质量都可满足，那么其他任何连接情况均可满足。这种连接是用假设的参考模型来表示的，即假设参考数字连接包含所有的传输、交换及其他功能单元。ITU-T 建议的一个标准的最长 HRX 包含 14 个假设参考数字链路和 13 个数字交换点，全长 27500 km，它是一个全数字的 64 kb/s 的连接。具体组成如图 4-23 所示。

对于 SDH 系统参考模型，将其定义为“假设参考数字通道（HRP）”，即两个用户间的国际最长参考通道，长度为 27500 km，我国最长的 HRP 全长为 6900 km。长途传输网络又可区分为长途网、中继网和用户网三部分，长途网中两个最远长途传输节点之间的距离为

6 500 km，在中继网、用户网间分别为 100 km，而实际公用网都小于 HRP。

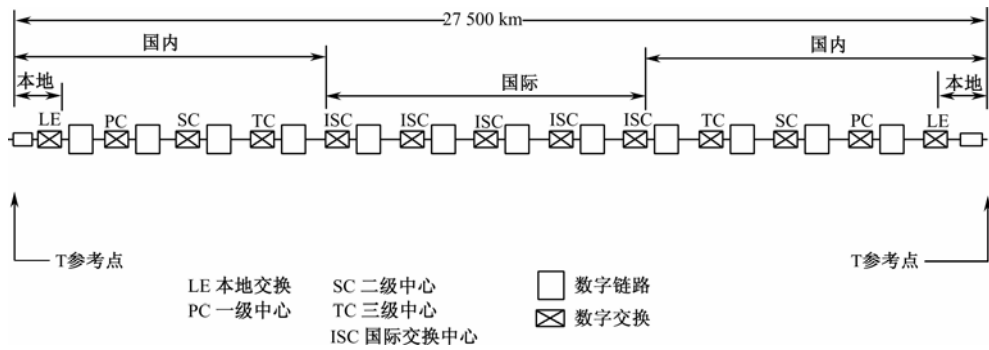


图 4-23 标准假设参考数字连接(HRX)

2. 假设参考数字链路 (HRDL)

为了简化数字传输系统的研究，把 HRX 中的 2 个相邻交换点数字配线架间所有的传输系统，复用、分接设备等各种传输单元（不包括交换），用假设参考数字链路 (HRDL) 表示。ITU-T 建议 HRDL 的合适长度是 2 500 km，根据我国地域广阔的特点，我国长途一级干线链路长度为 5 000 km。

3. 假设参考数字段 (HRDS)

为了具体提供数字传输系统的性能指标，把 HRDL 中相邻的数字配线架间的传输系统，用假设参考数字段表示。根据我国的特点，长途一级干线的 HRDS 为 420 km，长途二级干线的 HRDS 为 280 km，用于市话的 HRDS 长度为 50 km，在光纤系统中 HRDS 的两端是光端机，中间是光缆传输线路及若干光中继器。当然，一个光纤通信系统可以由若干 HRDS 组成。

HRX，HRP，HRDL 和 HRDS 之间的关系是 HRDS 等于两个数字配线架加若干个光中继器，HRDL 等于若干个 HRDS，HRX 或 HRP 等于若干 HRDL 加若干交换中心。

综上所述，HRX 的总性能指标可以按比例分配到其中的 HRDL 中去，HRDL 上的性能指标又可以再分配到 HRDS 中去。光纤通信系统的性能指标是在这 3 种参考模型的基础上指定的，它的重要指标有误码特性、抖动特性和可靠性。

4.5.2 系统的性能指标

数字光纤通信系统的主要性能指标有误码性能、抖动性能和可靠性。

1. 误码性能

误码性能是衡量数字通信系统质量优劣的重要指标，它反映了数字传输过程中信号受损害的程度。

1) 64 kb/s 数字连接的误码性能

在数字通信中常用比特误码率（BER）来衡量误码性能，误码率大小直接影响系统传输的业务质量，例如误码率对话音的影响程度如表 4.3 所示。

表 4.3 误码率对话音的影响程度

误 码 率	受话者的感觉
10^{-6}	感觉不到干扰
10^{-5}	在低话音电平范围内刚觉察到有干扰
10^{-4}	在低话音电平范围内有个别“喀喀”声干扰
10^{-3}	在各种话音电平范围内都感觉到有干扰
10^{-2}	强烈干扰，听懂程度明显不降
5×10^{-2}	几乎听不懂

所谓“平均误码率”就是在一定的时间内出现错误的码元数与传输码流总码元数之比，其表示式为：

$$\text{BER}_{\text{av}} = \frac{\text{错误接收的码元数}m}{\text{传输的总码元数}n} = \frac{m}{f_b \times t}$$

(4.7)

【例 4-1】 某信息码速率为 8.448 Mb/s 的光纤系统，若 $\text{BER}_{\text{av}}=10^{-9}$ ，求 5 min 内允许的误码数是多少？

解： $m=10^{-9}\times8.448\times10^6\times5\times60=2.5$ 码元

在通信网中除了语音，还有其他业务，为了能综合衡量各业务的传输质量，根据 ITU-T G.821 建议，可将误码性能优劣的指标分为 3 类：①劣化分 DM；②严重误码秒 SES；③误码秒 ES。其定义和指标（在 27 500 km 的假设参考数字连接情况下）如表 4.4 所示。

表 4.4 误码类别、定义和总指标（64kb/s）

类 别	定 义	全程全网指标
DM	在抽样观测时间 $T_0=1\text{min}$ ，若 $\text{BER}>10^{-6}$ ，则这 1min 为一个 DM	$\frac{\text{劣化分钟}}{\text{可用分钟}} < 10\%$
SES	在抽样观测时间 $T_0=1\text{s}$ ，若 $\text{BER}>10^{-3}$ ，则这 1s 为一个 SES	$\frac{\text{严重误码秒钟}}{\text{可用秒}} < 0.2\%$
ES	在抽样观测时间 $T_0=1\text{s}$ ，误码数至少为 1 个，则这 1s 为一个 ES	$\frac{\text{误码秒钟}}{\text{可用秒}} < 8\%$

表 4.4 中的指标是建立在统计意义上的，其中总的观测时间： $T_L=T_A+T_U$ ，式中 T_A 为可用时间（如可用分钟、可用秒），即系统处于正常工作状态的时间； T_U 为不可用时间（如劣化分钟、严重误码秒钟、误码秒钟）亦即故障状态时间。一般而言，总的观测时间以较大为好，如数天或一个月。在工程中常采用平均误码率来衡量系统的总体性能。

在实际的工程设计中，必须将 G.821 建议的总指标按照不同等级的电路进行分配，电路等级划分为高级、中级和本地级 3 种。如图 4-24 所示。

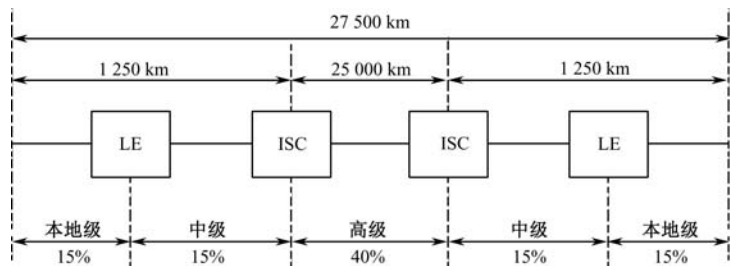


图 4-24 HRX 的电路等级划分及误码指标分配

3 种等级电路对误码性指标能指标分配如表 4.5 所示。该表的依据为 G.821 建议，高级指标按长度分配，等效每千米 0.001 6%，即在 25000 km 占总指标 40%。中级和本地级则按切块分配，即每段各占总指标 15%。表中对严重误码秒仅取总指标的一半（0.1%）参加分配，另一半留做高、中级电路全年最差月分用。

表 4.5 HRX 误码性能总指标分配

误码性能指标	高级电路	中级电路	本地级电路
DM<10%	4%	2×1.5%	2×1.5%
SES<0.1%	0.04%	2×0.015%	2×0.015%
ES<8%	3.2%	2×1.2%	2×1.2%

对我国通信网采用的四级汇接制，一般认为省中心以上的一级长途干线为高级电路；省中心至县中心的二级长途干线为中级电路；县中心以下为本地级。

误码指标的实际分配应以数字段为基础，G.921 建议提出了假设参考数字段（HRDS）长度、等级和误码指标的分配，如表 4.6 所示。

表 4.6 2 048 kb/s 系列假设参考数字段误码指标

质量分类	HRDS 长度/（km）	占总连接百分比/%	劣化分 1%	误码秒 1%	严重误码秒 1%	适用电路等级
1	280	0.45	0.045	0.036	0.000 45	高级
2	280	2	0.2	0.16	0.002	中级
3	50	2	0.2	0.16	0.002	中级
4	50	5	0.5	0.4	0.005	中级
总指标			10	8	0.1	

在 G.921 建议中规定，当实际数字段的长度小于 HRDS 长度，仍按标准的假设段长分配误码指标。例如，某省内二级干线全长 260 km，则按表 4.6 中第二类的 280 km 中级电路分配误码指标。当实际数字段长较 HRDS 长时，可按 HRDS 的整数倍进行分配。例如，某一级长途干线数字段长为 420 km，可按表 4.6 中第一类的 280 km 高级电路指标的两倍确定。

2) 高比特率数字通道的误码性能

根据 ITU-T G.826 建议 SDH 传输系统通道的误码性能，是以“块”为单位描述的，由此产生出以“块”为基础的一组参数。所谓“块”，是指一系列与通道有关的连续比特。当同一块内的任意比特发生差错时，就称该块为“误块”（EB）。

高比特通道误码性能参数如下：

（1）误块秒（ES）和误块秒比（ESR）。

当任意 1 s 内发现 1 个或多个误码块时，则称该 1 s 为误块秒。在规定测量时间内出现的 ES 数与总的可用秒数之比值称为误块秒比（ESR）。

（2）严重误块秒（SES）和严重误块秒比（SESR）。

当任意 1 s 内出现不少于 30% 的 EB 或者至少出现一次严重扰动期（SDP）时，称该秒为严重误块秒（SES）。其中“严重扰动期”指在测试时，最小等效于 4 个连续误块时间或 1 ms 时间段内，误码率 $>10^{-2}$ 或出现信号丢失，就认为出现了一次 SDP。

在测量时间段内出现的 SES 数与总的可用秒之比，称为严重误块秒比（SESR）。

$$SESR = \frac{\text{规定测量时间的SES总数}}{\text{总的可用时间(秒)}}$$

SESR 主要反映系统抗干扰能力，它与环境条件、自身抗干扰能力有关，与信息传输速率关系不大。

（3）背景误块（BBE）和背景误块比（BBER）。

扣除不可用和 SES 期间出现的 EB 以后所剩下的误块称为背景误块 BBE。在规定测试时间内出现 BBE 数与总的可用时间内的码块数之比称为 BBER。由于计算时已经扣除了引起 SES 和不可用时间的大突发性误码，因而该参数值的大小可以大体反映系统的背景误码水平。

以上三项指标中，SESR 要求最严，BBER 要求最松，只要通道满足了 SESR 指标，BBER 指标也能自动满足。

（4）误码性能指标分配

ITU-TG.826 建议为高比特率通道，全长 27500 km 的 HRP 每一段分配最高误码性能指标，在各段误码不高于标准情况的下，串联连接后才能满足 27500 km 端到端通道传输要求。误码性能指标按区段分配，如表 4.7、表 4.8 和表 4.9 所示。

表 4.7 420 km HRDS 误码性能指标

速率/(kb/s)	155 520	622 080	2 488 320
ESR	3.696×10^{-3}	9.24×10^{-3} （暂定）	1.85×10^{-2} （暂定）
SESR	4.62×10^{-5}	4.62×10^{-5}	4.62×10^{-5}
BBER	4.62×10^{-5}	2.31×10^{-6}	2.31×10^{-6}
BER _{av}	$\leq1\times10^{-11}$		

表 4.8 280 km HRDS 误码性能指标

速率/(kb/s)	155 520	622 080	2 488 320
ESR	2.464×10^{-3}	6.16×10^{-3} （暂定）	1.232×10^{-2} （暂定）
SESR	3.08×10^{-5}	3.08×10^{-5}	3.08×10^{-5}
BBER	3.08×10^{-5}	1.54×10^{-6}	1.54×10^{-6}
BER _{av}	$\leq0.8\times10^{-11}$		

表 4.9 50 km HRDS 误码性能指标

速率/(kb/s)	155 520	622 080	2 488 320
ESR	4.4×10^{-4}	1.1×10^{-3} (暂定)	2.2×10^{-3} (暂定)
SESR	5.5×10^{-6}	5.5×10^{-6}	5.5×10^{-6}
BBER	5.5×10^{-7}	2.75×10^{-7}	2.75×10^{-7}
BER _{av}	$\leq 0.3\times10^{-11}$		

2. 抖动性能

抖动是数字信号传输过程中产生的一种瞬时不稳定现象。抖动的定义是数字信号的特定时刻（如最佳抽样时刻）相对标准时间位置的短时间偏差。这种偏差包括输入脉冲信号在某一平均位置左右变化和提取时钟信号在中心位置左右变化，如图 4-25 所示。偏差时间范围称为抖动幅度（ J_{p-p} ）。抖动单位为 UI，表示单位时隙。当脉冲信号为二电平 NRZ 时，1UI 等于 1 bit 信息所占时间，数值上等于传输速率 f_b 的倒数。

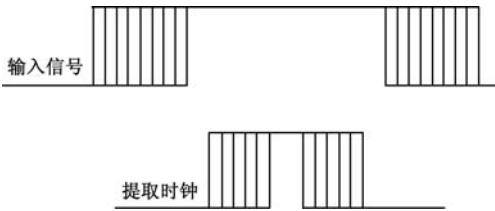


图 4-25 输入/输出抖动容限

产生抖动的原因很多，主要与定时提取电路的质量、输入信号的状态和输入码流中的连“0”码数目有关。抖动严重时，使得信号失真、误码率增大。完全消除抖动是困难的，因此在实际工程中，需要提出容许最大抖动的指标。ITU-T 建议抖动的指标有：输入抖动容限、输出抖动容限和抖动转移（抖动增益）等。

(1) 输入抖动容限

根据 ITU-T G.823 建议，输入抖动容限指在数字段内，满足误码特性要求时，允许的输入信号的最大抖动范围。显然，输入抖动容限值越大越好，说明数字设备和数字段适应抖动能力强。输入抖动容限应在图 4-26 所示曲线之上。

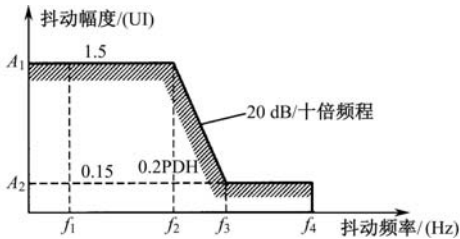


图 4-26 输入/输出抖动容限

(2) 输出抖动容限

根据 ITU-T G.921 建议，输出抖动容限指的是当系统没有输入抖动的情况下，而系统输出端的抖动最大值。该值应越小越好，说明设备和数字段产生抖动小。输出抖动容限应在

图 4-26 所示的曲线之下。

（3）抖动转移（抖动增益）特性

根据 ITU-T G.921 建议，抖动转移特性是指在一定频率下，数字设备或数字段输出信号的残余抖动与输入口的抖动量的比值，即 $G=20\lg$ （输出抖动幅度/输入抖动幅度），为了保证数字网的抖动指标，对每一个数字段，抖动转移增益不应该超过 1 dB，而数字设备的抖动转移增益不应该超过 0.5 dB。

1）PDH 系统抖动性能规范

PDH 系统各次群输入口对抖动容限的规范，如表 4.10 所示。

表 4.10 PDH 各次群输入抖动容限

参数值 速率 Mb/s	$J_{P,P}/(UI)$		测试滤波器参数			
	A_1	A_2	$f_1/(Hz)$	$f_2/(kHz)$	$f_3/(kHz)$	$f_3/(kHz)$
2.048	1.5	0.2	20	2.4	18	100
8.448	1.5	0.2	20	0.4	3	400
34.368	1.5	0.15	100	1	10	800
139.264	1.5	0.075	200	0.5	10	3500

2）SDH 系统抖动性能规范

为了实现 SDH 系统不同 STM 等级终端互连而不影响系统传输质量，必须对 SDH 系统接口的最大允许抖动做出了明确规定，如表 4.11 所示。

表 4.11 SDH 各 STM 等级输入抖动容限

参数值 速率 Mb/s	$J_{P,P}/(UI)$		测试滤波器参数		
	A_1	A_2	$f_1/(Hz)$	$f_2/(kHz)$	$f_3/(MHz)$
155.520	1.5	0.15	500	65	1.3
622.080	1.5	0.15	1 000	250	5
2 488.320	1.5	0.15	5 000	1 000	20

3. 可靠性

除上述性能指标外，衡量通信系统质量的优劣，可靠性也是一个重要指标，它直接影响通信系统的使用、维护和经济效益。对光纤通信系统而言，可靠性包括光端机、中继器、光缆线路、辅助设备和备用系统的可靠性。

确定可靠性一般采用故障统计分析法，即根据现场实际调查结果，统计足够长时间内的故障次数，确定每两次故障的时间间隔和每次故障的修复时间。

1）不可用时间 MTTR

传输系统任一传输方向的数字信号连续 10 s 期间内每秒的误码率均大于 1×10^{-3} 时，从这 10 s 的第一秒起就认为进入了不可用时间。

2）可用时间 MTBF

当数字信号连续 10 s 期间内每秒的误码率均小于 1×10^{-3} 时，从这 10 s 的第一秒起就认为进入了可用时间。

3) 可用性及可用性目标

可用性= (可用时间/总工作时间)×100%=MTBF/ (MTBF+MTTR)×100%;

不可用性= (不可用时间/总工作时间)×100%=MTTR/ (MTBF+MTTR)×100%

各类假设参考数字段的可用性目标，如表 4.12 所示。

表 4.12 假设参考数字段的可用性目标

长度/km	可用性	不可用性	不可用时间/年
420	99.977%	2.3×10^{-4}	120min/年
280	99.985%	1.5×10^{-4}	78min/年
50	99.99%	1×10^{-4}	52min/年

根据国家标准的规定，具有主备用系统自动倒换功能的数字光纤通信系统，容许 5 000 km 双向全程每年 4 次全阻故障，对应于 420 km 和 280 km 数字段双向全程分别为每 3 年 1 次和每 5 年 1 次全阻故障。市内数字光纤通信系统的假设参考数字链路长为 100 km，容许双向全程每年 4 次全阻故障，对应于 50 km 数字段双向全程每半年 1 次全阻故障。此外，要求 LD 光源寿命大于 10×10^4 h，PIN-FET 寿命大于 50×10^4 h，APD 寿命大于 50×10^4 h。

4.6 光纤通信系统的设计

光纤通信系统设计的任务是遵循规范建议，采用先进、成熟技术，综合考虑地区发展规划、人口因素、现有资源、系统经济成本，合理地选用系统使用的光缆、光器件和设备等，明确系统的全部技术参数，完成实用系统的集成。低速率的光纤通信系统设计相对比较简单，重点是核算中继段的长度和选择传输系统的制式及容量等级。高速光纤通信系统的设计比较复杂，主要原因是随着 DWDM 系统传输容量（速率）的提高，掺铒光纤放大器等不断实用化，给系统的集成带来一定的复杂性，主要考虑的问题仍然是系统传输速率、传输距离、业务种类及流量等。

4.6.1 系统的总体考虑

在系统设计时采用的产品必须符合相关的国家标准、行业标准、技术规范的要求，还应接受 ITU-T 的有关建议。此外还应考虑下述有关问题：

- (1) 综合考虑最佳路由和局站设置、系统的容量（传输速率等级）、传输距离、业务流量、投资额度和发展的可能性等相关因素。
- (2) 合理选择系统的传输体制，即 PDH、SDH 制式，工作波长、光缆型号和光电设备型号等，以满足对系统性能的总体要求。
- (3) 具有保证系统正常工作的其他配套设施。

目前可选用的光纤类型有 G.651 光纤、G.652 光纤、G.653 光纤、G.654 光纤、G.655 光纤。各光纤特性及适用范围如表 2-1 和表 2-2 所示，选用 G.652 和 G.655 这两种光纤最为普

遍，因为 G.652 光纤是在 1310 nm 波长性能最佳的单模光纤，适应开通长距离 622 Mb/s 及其以下系统；G.655 光纤是在 1550 nm 波长区开通 2.5 Gb/s、10 Gb/s 和 $N \times 2.5$ Gb/s 波分复用系统最适合的光纤。

4.6.2 系统传输中继段长的估算

在设计光纤传输再生中继段距离长度时，通常采用的方法是最坏值设计法，此方法是把所有参数值都按最坏值选取，这种设计方法不存在先期失效问题。在排除人为和自然界破坏因素后，按最坏值设计的系统，在其寿命终结，富余度用完，且处于极端温度条件下仍能 100%地保证系统性能要求。

光纤传输中继距离由光纤衰减和色散等因素决定。不同的系统，由于各种因素的影响程度不同，中继距离的设计方式也不同。在实际的工程应用中，设计方式分为两种情况，第一种情况是衰减受限系统，即中继距离根据 S 和 R 点之间的光通道衰减决定；第二种是色散受限系统，即中继距离根据 S 和 R 点之间的光纤色散决定。光缆线路工程施工范围示意图如图 4-27 所示。

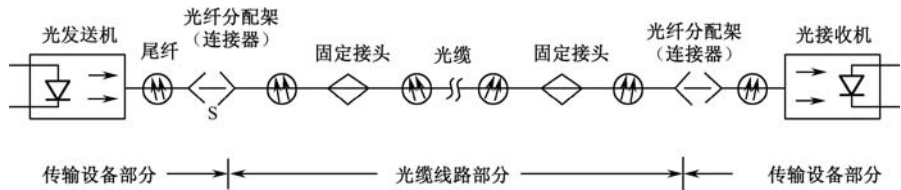


图 4-27 光缆线路工程施工范围示意图

1. SDH传输系统中继段长距离的估算

1) 衰减受限系统

衰减受限系统中继段长距离可用下式估算：

$$L = \frac{P_s - P_r - P_p - M_e - \sum A_c}{A_t + A_s + M_c} \tag{4.8}$$

式中， L 表示衰减受限中继段长度 (km)； P_s 表示 S 点发送光功率 (dBm)； P_r 表示 R 点接收灵敏度 (dBm)； P_p 表示光通道功率代价 (dB)，因反射、码间干扰、模分配噪声和激光器啁啾而产生的总退化，光通道功率代价不超过 1 dB，对于 STM-16 的 SDH 长距离系统，则不超过 2 dB； M_e 表示光缆富余度 (dB/km)，是指光缆线路运行中的变动（如维护时附加接头或增加光缆长度的）。外界环境因素引起的光缆性能劣化，S 和 R 点间其他连接器性能劣化，因此在设计中应保留必要的富余量。在一个中继段内，光缆总的富余度不应超过 5 dB，设计中按 3~5 dB 取值； M_e 表示设备富余度 (dB)，通常取 3 dB； $\sum A_c$ 表示 S 和 R 点之间所有光纤活动连接器损耗 (dB) 之和，如 ODF 架上的短接光纤连接设备连接器衰减，FC 型连接器平均 0.8 dB/个，PC 型平均 0.5 dB/个； A_c 表示每个活动连接器损耗 (dB/个)； A_t 表示光纤损耗系数 (dB/km)； A_s 表示每千米光缆固定接头平均衰减 (dB/km)，与光缆质量，熔接机性能，操作水平有关。设计中 A_s 按平均值 0.05~0.08 dB/km 取值。

2) 色散限制系统

根据 ITU-T 建议, 色散限制系统中中继段长距离可用下式估算:

$$L = \frac{\varepsilon \times 10^6}{D \times \Delta\lambda \times B} \quad (4.9)$$

式中, L 为色散限制中继段长度 (km); ε 为当光源为多纵模激光器时取 0.115, 单纵模激光器时取 0.306; B 是线路信号比特率 (Mb/s); $\Delta\lambda$ 为光源的谱宽 (nm); D 为光纤色散系数 [ps/(nm·km)]。这里需要说明的是低速率线路信号, 在单模光纤传输时, 一般可不考虑色散限制中继段距离。

【例 4-2】 设计一个 STM-4 长途光纤通信系统, 使用 G.652 光纤, 工作波长选定 1310 nm, 相关系统参数为: 平均发送光功率 $P_S = -3$ dBm, 接收灵敏度 $P_r = -28$ dBm, 活动接器总损耗 $\Sigma A_c = 2 \times 0.8$ dB, 光通道功率代价 $P_p = 0.5$ dB, 光缆光纤损耗系数 $A_f = 0.4$ dB/km, 光缆固定接头平均损耗 $A_s = 0.06$ dB/km, 光缆富余度 $M_c = 0.04$ dB/km, 设备富余度 $M_e = 2$ dB, 系统采用单纵模光激光器, 其谱宽 $\Delta\lambda = 4$ nm。试估计出该系统的最长中继段距离的值。

解: 按式 (4.8) 计算估计出该系统的中继段长度为:

$$\begin{aligned} L &= \frac{P_S - P_r - P_p - M_e - \sum A_c}{A_f + A_s + M_c} \\ &= \frac{-3 - (-28) - 0.5 - 2 - 2 \times 0.8}{0.4 + 0.06 + 0.04} = 41.8 \text{ km} \end{aligned}$$

按式 (4.9) 计算估计出该系统的中继段长度为:

$$L = \frac{\varepsilon \times 10^6}{D \times \Delta\lambda \times B} = \frac{0.306 \times 10^6}{3.5 \times 4 \times 622.080} \approx 35.1 \text{ km}$$

即实际最大中继距离为 35.1 km。

2. DWDM系统中中继段长距离的估算

DWDM 系统最大中继距离也是按照衰减受限和色散受限两个条件来估算的。DWDM 系统的传输线路主要设置有: 光终端复用 OTM、光交叉连接 OXC、光放大器 OLA (光中继器) 和光放大器之间对应的光放段 L_A 、中继距离段 SR 或复用段, 如图 4-28 所示, 图中 OLA 为掺铒光纤放大器。DWDM 传输系统中继距离的设计, 需根据光功率、色散和信噪比的计算结果, 确定光放大器的增益类型和中继段内允许的光放段数量。

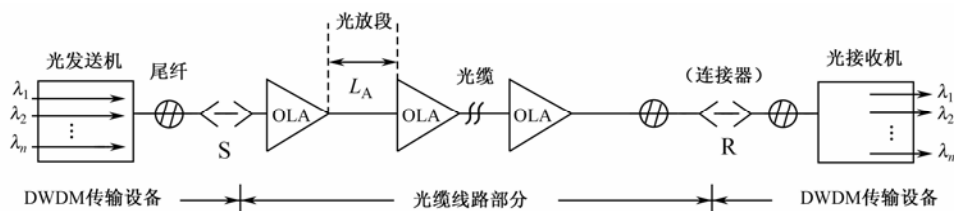


图 4-28 DWDM 系统示意图

1) 衰减受限系统

首先讨论 DWDM 系统的光放段长度 L_A 估算。 L_A 通常按等增益传输进行设计, 即以中继段为单元, 假设段内各光放大器均设计为等增益工作状态, 各放大器的输出光功率均相

同，其接收灵敏度也相同，如光放段的光缆损耗小于放大器的增益，则应用光衰减器进行调节。

光线路放大器的增益类型一般有 22 dB，30 dB，33 dB 等 3 种类型，根据光放大器的增益类型，通过光放段的光功率计算，按一个中继段内最大光功率段选定。

光放段的长度计算公式为：

$$L_A = \frac{G - \sum A_c}{A_f + M_c + A_s}$$

(4.10)

式中， L_A 为光放段长度（km）； G 是光放大器增益（dB）； $\sum A_c$ 为光放段间光纤连接器损耗之和（dB）； A_f 为光纤衰减系数（dB/km）； M_c 是光缆富余度（dB/km）； A_s 表示每 km 光纤固定接头平均损耗（dB/km）。

例如，某 G652 单模光纤系统扩容改造为 DWDM 系统工程，工作波长采用 1550 nm，实测光纤双向平均衰减系数 $A_s + A_f = 0.25$ dB/km（含光纤固定接头损耗），光缆富余度 $M_c = 0.04$ dB/km，光纤连接器总损耗 $\sum A_c = 2 \times 0.5$ dB。则利用式（4.10）计算出不同放大器增益的光放段的长度如表 4.13 所示。

表 4.13 不同光放大器的增益与所对应的光放段长度估算

光放大器的增益 G (dB)	22	30	33
光放段距离估算 L_A (km)	72	100	110

光放段的设置段数必须与系统发 S、收 R 间中继距离进行权衡，总的来说，如果减少光放大器的增益，那么在光纤通信系统 S、R 间的传输中继距离间增加光放段的段数是可行的。一般每个系统 S、R 之间可达 3 个 120 km 的光放段或 8 个 80 km 光放段的级联，通常以每个光放段的外部设备预算损耗值（dB）来对传输系统进行规范，如 3 级联系统可表示为 3×33 dB 系统，8 级联系统可表示为 8×22 dB 系统。由此，DWDM 系统衰减受限中继段长度 L 由各光放段长度相加求得：

$$L = \sum_{i=1}^n L_{Ai} = \sum_{i=1}^n \frac{G_i + \sum A_{ci}}{A_{fi} + M_{ci} + A_{si}}$$

(4.11)

式中， n 为 DWDM 系统光放段数量；第 i 光放段的相关参数：光放段长度 L_{Ai} （km）；光放大器增益 G_i （dB）；光纤连接器损耗之和为 $\sum A_{ci}$ （dB）；光纤衰减系数 A_{fi} （dB/km）；光缆富余度 M_{ci} （dB/km）；每 km 光纤固定接头平均损耗 A_{si} （dB/km）。

2) 色散限制系统

中继段的长度与允许的光放段数量需符合光通道色散和信噪比的要求。一个中继段光通道允许的色散即为一个中继段总的最大色散，多数厂商的 DWDM 系统总的允许最大色散值设为 6400 ps/nm 和 12 800 ps/nm 两挡。如果已知光纤的色散系数，允许的中继段长度 L 可按式（4.12）计算。对 G.652 和 G.655 光纤，计算出允许的中继段长度如表 4.14 所示。

$$L = \frac{D_{\max}}{D}$$

(4.12)

式中， L 为色散受限系统中继段长度（km）； D_{\max} 是 S 和 R 点之间允许的最大色散值（ps/nm）； D 为光纤色散系数（ps/nm · km）。

表 4.14 色散系数与对应的中继段长度估算值（设工作波长在 1550 nm 窗口）

光纤类型	G.652		G.655	
光纤的色散系数 D (ps/nm km)	20		6	
光通道允许的色散 D_{\max} (ps/nm)	6400	12800	6400	12800
中继段长度 L (km)	320	640	1060	2133

配置 DWDM 系统中继段长时，必须考虑同时满足光功率，光放大器的增益，光通道色散，光信号的信噪比的要求，此外，在传输系统的指标方面，仍应满足 SDH 系统关于抖动与误码指标的要求，对于中继段应满足 BER 小于或等于 1×10^{-12} 的要求。

在 DWDM 系统中，光放段数量 N 可用下式计算：

$$N = 10^{\frac{58 + P_0 - N_f - G - \text{OSNR}}{10}}$$

(4.13)

式中， P_0 为单波道输出光功率（dBm）； N_f 为光放大器的噪声系数（dB）； G 是光放段增益（dB）；OSNR 是单波道信噪比（dB）；58 为综合系数。

中继段的信噪比的计算比较复杂，单波道的信噪比一般要求大于或等于 20 dB（或 22 dB）。假如单波道输出光功率 $P_0=7$ dBm，光放大器噪声系数 $N_f=8$ dB，光放段增益 G 分别为 22 dB, 30 dB,33 dB 的情况下，计算结果如表 4.15 所示。

表 4.15 光放段数量与对应的光放段增益估算值

单波道信噪比（dB）	20			22		
光放段增益（dB）	22	30	33	22	30	33
光放段数量（个）	≥8	5	2	≥8	3	1

3. 高速光纤系统PMD限制中继段长的估算

当设计高速率光纤系统（如 DWDM 系统，10 Gb/s 以上）时，光纤链路偏振模色散 PMD 将直接限制系统传输速率，或者限制系统传输中继距离（参见 2.4.2 节）。由式（2.46）可分析讨论在高速光纤传输系统中，PMD 对光纤传输距离或传输速率影响：

$$L = [\frac{1}{10\text{PMD}_C \times B_L}]^2 \text{ 或 } B_L = \frac{1}{10\text{PMD}_C \sqrt{L}}$$

其中， PMD_C 为偏振模色散系数（s/√km）； B_L 为传输速率（b/s）； L 为光纤中继距离（km）。表 4.16 列出了 PMD_C 与传输速率和光纤传输距离的关系实例。

表 4.16 PMD_C 与传输速率和传输距离的关系

PMD_C (ps/√km)	2.5Gb/s 的传输距离	10Gb/s 的传输距离	40Gb/s 的传输距离
3.0	178 km	11 km	<1km
1.0	1600 km	100 km	6 km
0.5	6400 km	400 km	25 km
0.2	40000 km	2500 km	156 km
0.1	160000 km	10000 km	625 km

习 题

1. 画出 LD 和 LED 直接调制原理图。
2. 简述 LD 光发射机中 APC,ATC 的目的，需要控制哪些量才能达到目的。
3. 简述 LD 光发射机中偏置电流 I_b 和驱动电流 I_p 的取值依据。
4. 简述光接收机灵敏度高、动态范围大的物理意义。
5. 简述导致灵敏度恶化的因素。
6. 简述劣化分、严重误码秒、误码秒、严重误块秒和误块秒在定义上的差异。
7. 简述 HRX, HRP, HRDL, HRDS 之间的关系。
8. 什么是数字信号的抖动？
9. 抖动单位 UI 表示的含义是什么？
10. 简述线路编码的目的， $mBnB$ 码和 $mB1P$ 的码结构、码速提高率是多少？
9. 简述光中继器与光放大器在传输系统应用中的区别。
10. 有一个二次群 8.448 Mb/s 光纤通信系统，全长 280 km。当采用在二次群接口上对端环回、本端测量的方法监测 24 h 误码时，误码仪每秒记录一次误码，其结果如表 4.17 所示。

表 4.17 误码仪测试记录

时 间	误 码 个 数	时 间	误 码 个 数
00:00:00	0
12:10:00	700	21:30:29	8 600
...	...	21:30:31	900
13:10:41	500
13:10:42	8 500	21:31:32	520
...
14:15:00	600	23:59:59	540

注：表中未标出的时间内误码个数为 0。

试求：

- (1) 系统的平均误码率 BER_{av} ；
- (2) 系统的误码性能参数劣化分 DM、严重误码秒 SES 和误码秒 ES 并考查是否满足指标等级分配。
11. 若利用二极管的负温度系数（ $-2.5\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ）补偿 LED 的温度特性，LED 温度补偿电路如图 4-29 所示， $R=10\ \Omega$ 。LED 的温度特性曲线如图 4-30 所示，为了保证输出光功率为 $50\ \mu\text{W}$ ，工作环境温度在 $20\sim 40^{\circ}\text{C}$ 变化时，试计算需要几个二极管串联就能使输出光功率保持不变。

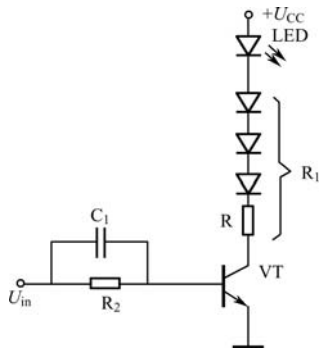


图 4-29 LED 温度补偿电路

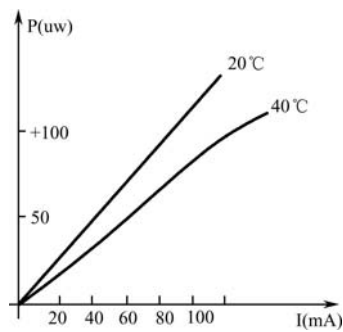


图 4-30 LED 的温度特性曲线

12. 已知 STM-1 的光纤通信系统的光纤损耗为 0.6 dB/km，光纤接续损耗平均每千米 0.2 dB，光纤活动接头损耗 0.5 dB/个，光源的入纤功率可调范围为 0.4~0.6 mW，接收的灵敏度可调范围为-42~-36 dBm，LD 的谱线宽度 $\Delta\lambda=1$ nm，发光波长 1 550 nm，设计时已给设备和光纤的富余度共为 6 dB。求系统可以达到的最长无中继传输距离。
13. 如某 G.652 单模光纤系统扩容改造为 DWDM 系统工程，工作波长采用 1550 nm，实测光纤双向平均衰减系数 $A_s+A_r=0.25$ dB/km（含光纤固定接头损耗），光缆富余度 $M_c=0.04$ dB/km，光纤连接器总损耗 $\Sigma A_c=2\times 0.5$ dB。当放大器的增益为 20 dB、40 dB 时，求所对应的光放段长度为多少 km？
14. 设计高速率光纤系统（如 DWDM 系统）20 Gb/s、40 Gb/s 时，已知偏振模色散系数 PMD_c 分别为 $0.2\text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 、 $0.3\text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 、 $0.15\text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ ，求分别估算最长中继段距离为多少 km？

第 5 章 SDH光同步数字传输网络

进入 21 世纪人们对信息的需求与日俱增，顺应时代发展，光纤通信在电信网、计算机网、专用网中获得了大规模应用，仅电信网其应用场合已遍及长途通信网、本地电话网并逐步转向用户接入网。而且从以电话业务为主的电信网络逐步扩展到以多媒体业务为主的信息通信网络，用户带宽也由 64 kb/s 将逐步提高到 6 Mb/s 左右，由此估计通信网总业务量将增加约 100 倍。如果考虑到今后要支持诸如付费电视、可视电话、数字图像（DVD）、高清晰度电视（HDTV）等更宽带宽的业务以及按指数规律逐年增长的 Internet 业务，网络宽带化将是人们不可避免的迫切需求。由于光纤通信技术的成熟，特别是密集波分复用（DWDM）技术的发展，使得网络的传输带宽大大增加。如果双绞铜线的传输带宽按 2 Mb/s 估计，一根采用 DWDM 技术的光纤传输容量可达到 20~200 Gb/s，也就是说，光纤的传输容量是铜线的一万至十万倍，因此宽带化意味着光纤将成为主要的传输媒质。

5.1 SDH传输体制的基本概念

5.1.1 基本概念与帧结构

数字传输体制有两种，即 PDH 和 SDH。PDH 早在 1976 年实现了标准化，在 1990 年以前，光纤通信一直沿用准同步数字体系（PDH）。随着电信发展和用户需求不断提高，PDH 系统在运用中暴露出一些明显的弱点，SDH 解决了 PDH 存在的问题。SDH 数字传输体系是 1988 年由 ITU-T 参照 SONET（同步光纤网）概念提出的规范建议，并批准了一系列 SDH 的有关标准，ITU-T 已通过 15 个建议，使之成为不仅适用于光纤传输，而且也适用于微波和卫星传输的全世界统一的技术体制，形成了一套高度标准化的技术规范。

1. SDH网节点接口与速率等级

一个电信传送网原则上由两种基本设备构成，即由传输设备和网络节点设备构成。传输设备可以是光纤线路系统，也可以是微波或卫星系统。而网络节点设备有多种，简单的仅有复用功能，复杂的有复用、交叉连接和交换功能。为了实现全球统一电信网的最终目标，必须统一网络（或网络节点）—网络（或网络节点）接口（Network-to-Network Interface, NNI），其先决条件是要有一个统一规范的接口速率和信号的帧结构。SDH 网具备了这个条件。SDH 网是在统一的网管系统下，主要采用光纤信道实现多节点间同步信息传输、复用、分插复用和交叉连接等功能的网络。SDH 网节点与节点之间具有世界统一的 NNI，如图 5-1 所示。

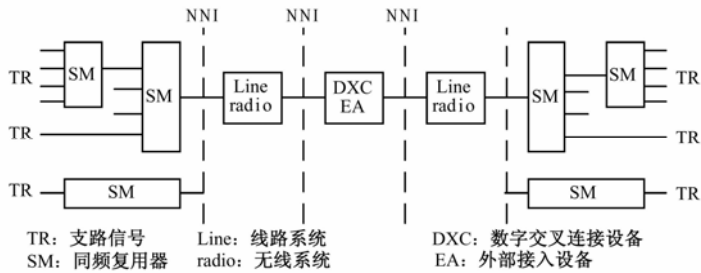


图 5-1 NNI 的位置示意图

SDH 网节点统一就意味着有一套标准化的信息结构速率等级，称为“同步传输模块”(STM- N , N 为 1, 4, 16, 64, …)。如果 SDH 信号是 STM-1, 其网络节点接口的速率为 155.520 Mb/s, 更高等级的 STM- N 速率是 155.520 Mb/s 的 N 倍。目前 SDH 能支持的等级 N 为 1, 4, 16 和 64。

- SDH 网的主要特点可归纳为：
- (1) 有标准光接口；
 - (2) 同步字节复用（复接）；
 - (3) 强大的网络管理功能；
 - (4) 有世界统一的数字信号速率和帧结构标准；
 - (5) SDH 与 PDH 网络具有完全的兼容性。

任何事物都不是十全十美的，SDH 系统也有其不足之处：

- (1) 由于增加了大量的维护管理比特，因此频带利用率不如 PDH 系统。例如 PDH 四次群 (139.264 Mb/s) 与 SDH 的 STM-1 (155.520 Mb/s) 相同，都能复用 64 个 2.048 Mb/s。
- (2) 由于在复接中采用了指针调整技术，使技术和设备复杂。
- (3) 由于大量采用了软件进行控制、管理与维护，如果出现人为因素或设备、软件故障及计算机病毒侵入，会导致系统发生重大故障，甚至造成系统瘫痪。

随着技术的不断发展、进步，传输信道的带宽更宽，这些弱点会逐渐被克服。

2. SDH的帧结构

SDH 采用以字节为基础的块状帧结构，STM- N 的帧结构如图 5-2 (a) 所示，其帧长为 125 μ s，帧频为 8 000 帧/s，合计 $9 \times 270N$ 字节，每帧分为 9 行， $270N$ 列个字节。帧结构中字节的传输是从左到右，由上而下按顺序一个字节一个字节地进行传送。STM- N 帧结构分为 3 个区域：净负荷、段开销和管理单元指针。

净负荷是结构中存放各种信息容量的地方，其中含有少量用于通道监测、管理和控制的通道开销字节 (Path Overhead, POH)，POH 包含低阶 LPOH (VC-11/VC-12 的 POH) 和高阶 HPOH (VC-3/VC-4 的 POH)；段开销 (Section Overhead, SOH) 如图 5-2 (b) 所示，是为了保证信息净负荷正常、灵活地传送所必需的附加字节，主要供网络运行、管理和维护使用。SOH 分为两部分，第 1~3 行为再生段开销 (RSOH)，其作用是监控 STM- N 信号在再生段（两再生中继器间的传输链路，见图 5-12）的传输状态，第 5~9 行为复用段开销 (MSOH)，作用是监控 STM- N 信号在复用段（两线路终端设备间的传输链路，见图 5-12）的传输状态；帧结构中的第 4 行前 $9N$ 列为管理单元指针 (AU-PTR: Administration Unit

Pointer), 它是一种指示符, 主要用来指示信息净负荷的第一个字节在 STM-*N* 帧内的准确位置, 以便在接收端根据这个指示符的值 (指针值) 正确分离信号净负荷。

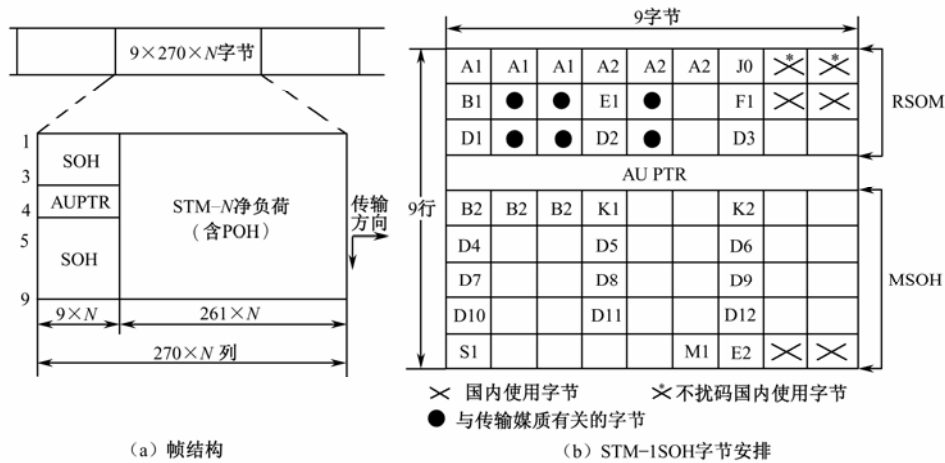


图 5-2 STM-*N* 帧结构

5.1.2 SDH的段开销字节

开销字节传送的不是用户的业务信息, 而是SDH网络中的控制与维护信息。对于STM-*N* (*N*=1, 4, 16, …) 的帧结构和段开销, 是由STM-1帧结构和段开销按一定规律经字节间插同步复用而成, 因而分析清楚STM-1结构, STM-*N*结构就不难分析。

STM-1段开销中各字节的安排以及它们的功能和用途如表5.1所示。

表 5.1 SOH 各字节的功能

类 别	缩 写 字 符	功 能
帧定位字节	A1, A1, A1, A2, A2, A2	识别帧的起始位置 A1=11110110 A2=00101000
再生段踪迹字节	J0	重复发送“段接入点识别符”
比特间插奇偶校验码 (BIP-8)	B1	再生段误码监测
公务字节	E1, E2	E1 和 E2 分别用于 RSOH 和 MSOH 的公务通信通路
使用者通路	F1	为使用者 (通常指网络提供者) 特定维护目的而提供的临时通路连接
数据通信通路 (DCC)	D1~D12	SOH 中用来构成 SDH 管理网 (SMN) 的传送链路
误码监测 (BIP-24)	B2	复用段误码监测
自动保护倒换 (APS) 通路	K1, K2	用做 APS 信令
同步状态字节	S1 (b5~b8)	S1 的后 4 bit 表示同步质量等级
空闲字节	M1	未正式定义

5.1.3 SDH的复用映射结构

同步复用映射方法是 SDH 的特色之一，它使数字信号的复用由 PDH 大量僵硬的硬件配置转变为灵活的软件配置。SDH 的复用分为两步：一是将 PDH 通过映射、定位和复用成 STM-1，二是把 STM-1 通过字节间插复用成 STM-N。SDH 对于 155.520 Mb/s 以上的信号，采用同步复接的方法，而对于低速支路信号，采用固定位置映射法，不仅不同制式的 PDH 低速信号，而且异步转移模式（ATM）等其他信号都能映射进 SDH 的帧结构中去。

1. SDH复用映射结构

ITU-T G.709 建议了 SDH 的基本复用映射结构，如图 5-3 所示。图中 SDH 的基本复用单元包括标准容器（C-n）、虚容器（VC-n）、支路单元（TU-n）、支路单元群（TUG-n）、管理单元（AU-n）和管理单元群（AUG），其中 n 为单元等级。

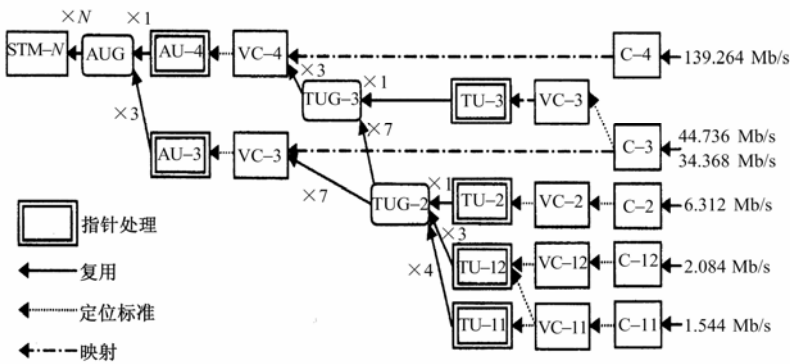


图 5-3 G.709 建议的 SDH 复用映射结构图

复用映射结构中各部分单元功能与作用简介如下。

1) 标准容器 C-n

标准容器是一种用来装载各种速率等级的数字业务信号的信息结构，对应 PDH 速率体系有 C-11, C-12, C-2, C-3 和 C-4，例如 2.048 Mb/s 的 PDH 码流装进 C-12 容器里。这些容器主要完成码速调整等适配功能。

2) 虚容器 VC-n

虚容器是由标准容器输出的数字流加上通道开销 POH 后构成的，这个过程称为映射。VC-n 的封装速率与 SDH 网同步，因此不同 VC-n 是互为同步的，而 VC-n 内部却允许承载来自不同标准容器 C-n 的净负荷。虚容器 VC-n 根据承载净负荷容量可分为高阶和低阶虚容器，VC-11, VC-12 和 VC-2 为低阶虚容器，VC-3 和 VC-4 为高阶虚容器。

3) 支路单元 TU-n 和支路单元群 TUG

TU-n 由一个相应的低阶 VC-n 和一个相应的支路单元指针 TU-n PTR 组成，即：

$$TU-n=VC-n+TU-n \text{ PTR}$$

TU-n PTR 又称为一级定位指针，它指示低阶 VC-n 净负荷起点相对于高阶 VC 帧起点间的偏移。

TUG 把一些不同规模的 TU- n 组合成一个 TUG 的信息净负荷，可增加传送网络的灵活性。例如 1 个 TUG-2 由 1 个 TU-2 或 3 个 TU-12 或 4 个 TU-11 按字节间插组合而成。

4) AU- n 管理单元和管理单元群

AU- n 由一个相应的高阶 VC- n 和一个相应的管理单元指针 AU- n PTR 组成：

$$\text{AU-}n = \text{高阶 VC-}n + \text{AU-}n \text{ PTR}$$

AU- n PTR 又称为二级定位指针，它指示高阶 VC- n 净负荷起点相对于复用段帧起点的偏移。AU 指针相对于 STM- N 帧的位置总是固定的。

AUG 是在 STM- N 的净负荷中固定占有规定位置的 1 个 AU 或多个 AU 集合构成。例如 1 个 AUG 由 1 个 AU-4 或 3 个 AU-3 按字节间插组合而成，在 AUG 中加入段开销后便可进入 STM- N 。

5) 指针

指针除了用来指定信息净负荷的起点位置，在 SDH 中还利用指针来调整频率或相位，以便实现码流同步，其作用可归纳为：

- (1) 当网络处于同步工作状态时，指针用来实现信号间的相位校准；
- (2) 当网络失去同步工作状态时，指针用作频率和相位校准；
- (3) 指针还可以吸收网络中的频率抖动和漂移。

2. SDH的复用映射过程举例

SDH 的复用映射过程就是各种业务信号复用进入 STM- N 帧的过程，它必须经历映射、定位和复用三大关键步骤。

1) 映射

映射就是非 SDH 信息流适配装进相应虚容器 VC- n 的过程，其实质就是使各种支路信号与相应的虚容器 VC- n 容器同步，使 VC 成为可以独立进行传送、复用和交叉连接的实体，例如 PDH 的支路信号映射到 VC-12, VC-4 等。

ATM 信元的映射是将 ATM 信元 53 字节装进 C-4 或 C-3，然后 C-4+HPOH 或 C-3+HPOH 映射进入 VC-4 或 VC-3，即 ATM 信元映射进入 VC-4 或 VC-3，在映射同时加 HPOH，实际上是 C-3+HPOH 或 C-4+HPOH 构成 VC-3 或 VC-4。

2) 定位

定位是一种将帧偏移信号收进支路单元 TU- n 或管理单元 AU- n 的过程，在发生相对帧的相位（或频率）偏差，使 VC 帧起点偏差浮动时，指针的值随之增加或减少以进行灵活动态定位，确保指针始终准确指示 VC-4 或 VC-12 在 AU-4 或 TU-12 帧中的准确起点位置。

3) 复用

复用是使多个低阶通道层信号适配进高阶通道或者多个高阶通道层信号适配进复用层的过程，即以字节间插方式把 TU 组织进高阶 VC 或把 AU 组织进 STM- N 的过程。

下面以我国 PDH 一次群 2.048 Mb/s 复用为 STM-1 的过程为例说明图 5-3 所示的复用结构，其步骤如图 5-4 所示。

从图 5-4 中可以看出复用过程为：

- (1) 先将标称速率为 2.048 Mb/s 的 PDH 一次群支路信号装进入 C-12 经适配处理，加上 VC- n POH 构成 VC-12 后，其速率为 2.240 Mb/s。VC-12 加上 TU-12-PTR，以指明 VC-12

相对 TU-12 的相位，经速率调准和相位对准后的 TU-12 速率变为 2.304 Mb/s。

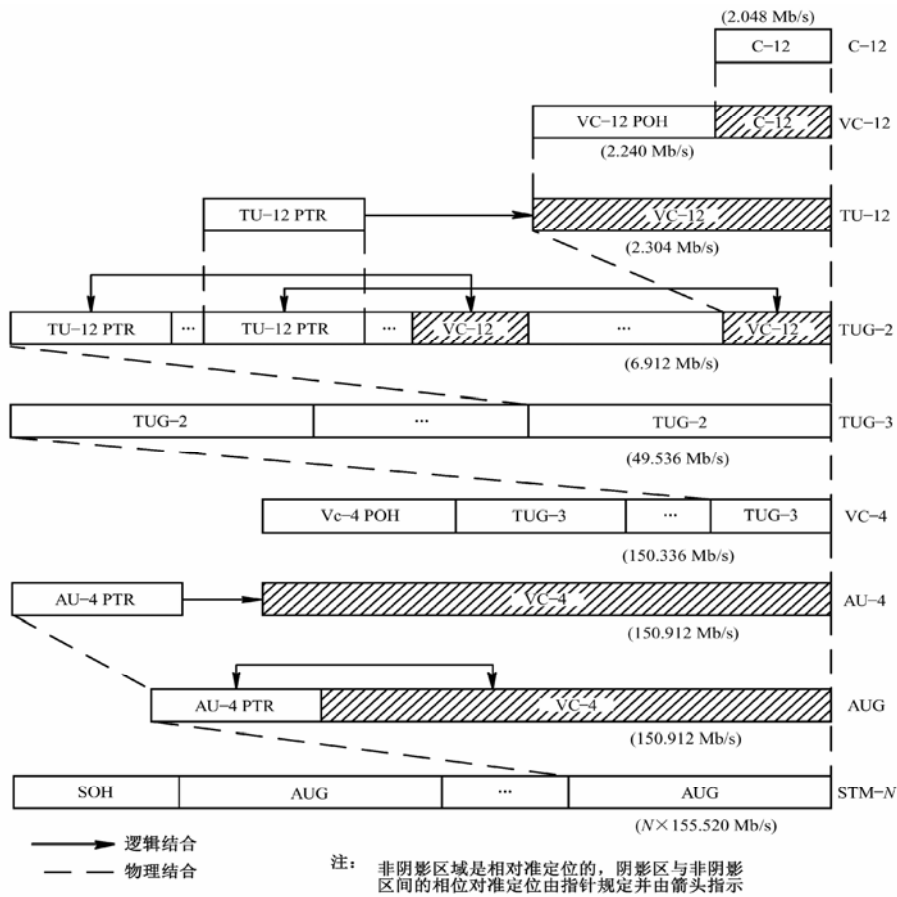


图 5-4 2.048 Mb/s 支路信号复用映射过程

- (2) 经同步复接，即间插组成 TUG-2 (3×2.304 Mb/s)，又经 7 个 TUG-2 单字节间插组成 TUG-3 (加上塞入字节使速率达到 49.536 Mb/s)，再由 3 个 TUG-3 经字节间插加上高阶 POH 和塞入字节后构成 VC-4 净负荷，速率为 150.336 Mb/s。
- (3) 最后加上 AU-4PTR 的 576 kb/s 的指针信号组成了 AU-4，速率为 150.912 Mb/s。单个 AUG 直接接入加上 4.608 Mb/s 的段开销组成 STM-1 (标称速率为 155.520 Mb/s) 的帧结构。

5.2 SDH的基本网络单元设备

SDH 设备是根据 SDH 帧结构和复接方式来设计的，为了使设备在网络中与其他设备互通及兼容，就需要制订统一标准，对各种设备进行规范。为此，ITU-T G781 规定了 SDH 复用设备协议结构；G782 又规定了 SDH 复用设备的类型和一般特性；G783 协议给出了 SDH 设备的基本功能块的功能描述。SDH 基本网络单元设备有终端复用器 (TM)、分插复用器

(ADM)、再生中继器 (REG) 和同步数字交叉连接设备 (DXC)。这些设备都是由各种逻辑功能块组合而成的，下面简单介绍之。

5.2.1 终端复用器TM和分插复用器ADM

SDH 网的基本网络单元中最重要的两个网络单元是终端复用器和分插复用器。以 STM-1 等级为例，其各自的功能如图 5-5 和图 5-6 所示。

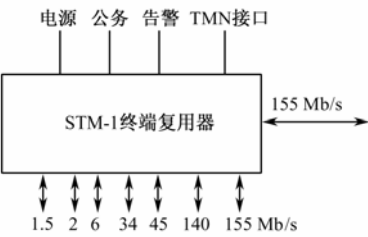


图 5-5 STM-1 终端复用器

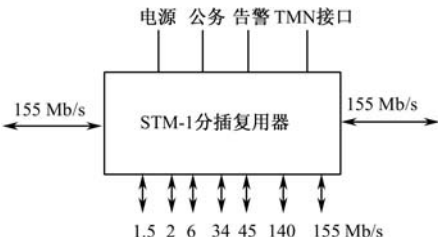


图 5-6 STM-1 分插复用器

终端复用器 TM 的主要任务是将 PDH 各低速支路信号纳入 STM-1 帧结构，并经电/光转换为 STM-1 光线路信号，其逆过程正好相反。

分插复用器 ADM 是将同步复用和数字交叉连接功能综合于一体，具有灵活地分插任意支路信号能力的网络设备，在组网上有很大灵活性。支路盘接口速率是 2 Mb/s，34 Mb/s 和 140 Mb/s。另外，ADM 也具有电/光转换、光/电转换功能。

ADM 设备充分体现了 SDH 系统的特点，具有灵活的上、下电路功能。ADM 设备可以替代 TM 作为终端复用器，其内部结构，如图 5-7 所示。它可以在系统中间站方便地将支路信号从主信号码流中提取出来，也可将支路信号方便地插入到主信号码流中。还可以将西向线路的 STM-1 光信号穿到东向线路上。从而方便地实现网络中信号码流的分配、交叉与组合。

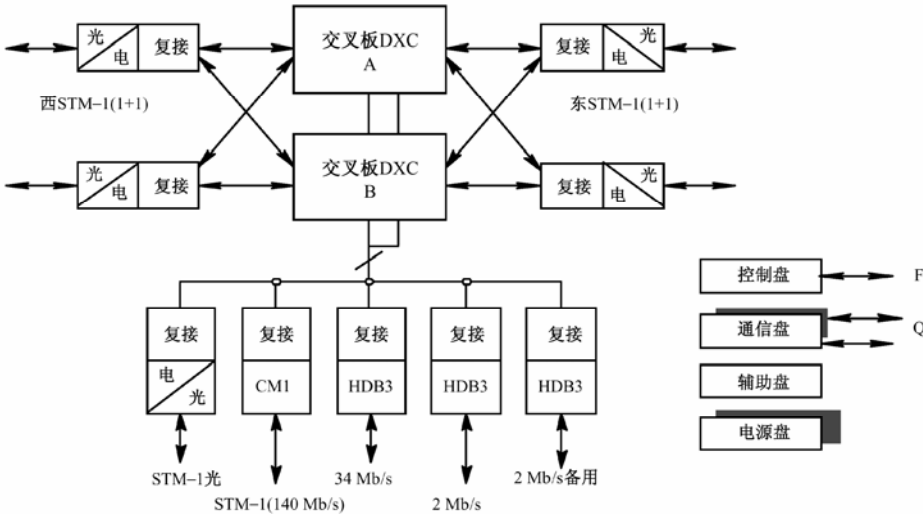


图 5-7 ADM 功能图

5.2.2 再生中继器（REG）

再生中继器（REG）示意图如图 5-8 所示。其作用是将光纤长距离传输后受到较大衰减及色散畸变的光脉冲信号转换成电信号进行放大、整形、再生为原电脉冲信号，再调制光源变换为光脉冲信号送入光纤继续传输，以延长通信距离。

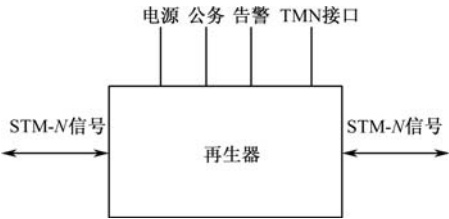


图 5-8 再生中继器示意图

5.2.3 数字交叉连接设备（DXC）

数字交叉连接设备（DXC）是 SDH 网络的重要网络单元，兼有复用、配线、保护/恢复、光/电和电/光转换、监控和网管多项功能。在 SDH 中 DXC 实现交叉连接的支路可以是各同步传递模块 STM-N（ $N=1, 4, 16, 64$ ），也可以是更低等级的信号，包括 PDH 的各支路信号及各种虚容器。常常把数字交叉连接的功能内置在 ADM 中或者说 ADM 包括了数字交叉连接的功能。通常用 DXC m/n 表示一个 DXC 类型，其中 $m \geq n$ ， m 表示接入速率最高等级， n 表示参与交叉连接的最低速率等级。

DXC 的作用与交换机不同，交换机实现的是用户之间的动态连接，用户有权改变这个连接；而 DXC 实现的是支路之间的交叉连接，是半永久性的连接，用户无权改变这个连接，这个连接的改变是由网管中心控制。

数字交叉连接设备 DXC，对提高 SDH 系统组网的灵活性和自愈能力有很大作用。它是一种可以在某端口信号与其他端口的信号之间进行可控连接和再连接的设备。DXC 的交叉功能，如图 5-9 所示。

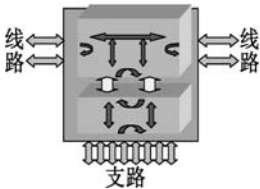


图 5-9 DXC 的交叉结构

5.3 SDH网络结构与保护

5.3.1 传送网的分层与分割

传送网与传输网是电信网中两个常用的概念，传送网是一个强调逻辑功能的网络概念，定义为在不同地点之间传递用户信息的全部功能的集合，它与传输网的概念存在着一定的区别，传输网是一个强调物理实体的网络，它是由具体设备的集合组成。在某种意义上，

传输网或传送网都是可泛指全部实体网络和逻辑网，本节将从逻辑的角度简单描述有关传送网定义和规范。

传送网是一个复杂、庞大的网络，为了设计和管理方便，网络采用分层（Layering）和分割（partitioning）的概念。传送网从垂直方向可以分解为若干独立的层网络，SDH 传送网可分为电路层、通道层和传输媒质层，如图 5-10（a）所示，下一层为上一层提供服务。在分层结构的基础上，再从水平方向上将每一层网络按照其内部结构分为若干部分（子网），如图 5-10（b）所示，这就是分割。因而分层与分割的关系是相互正交的。

首先介绍对 SDH 传送网垂直方向分层模型，然后对分层模型进行再分析（解剖），SDH 传送网分层模型，如图 5-11 所示。

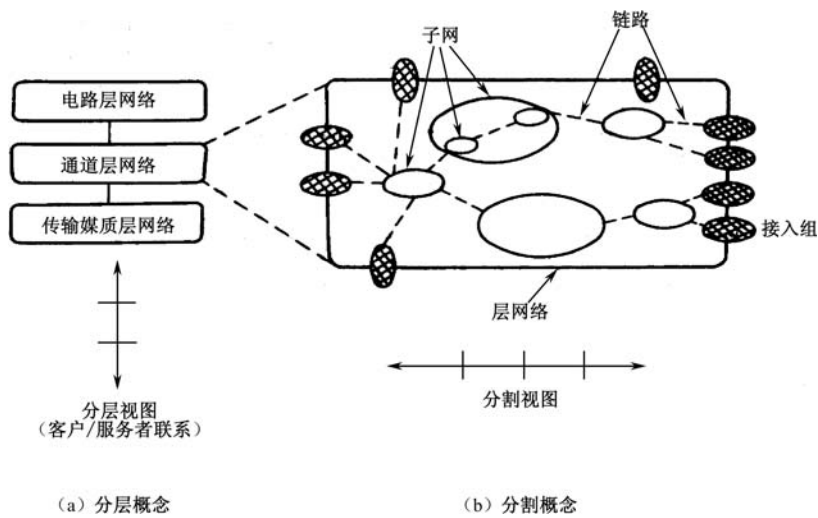


图 5-10 传送网分层与分割的关系

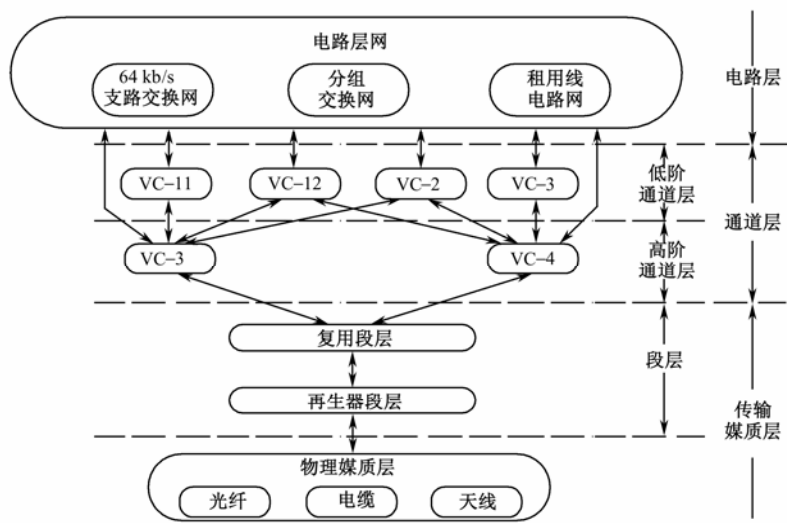


图 5-11 SDH 传送网分层模型

1. 电路层

电路层主要为用户提供各种交换数字业务信号，它包括电路交换网提供的语声信号，分组交换网提供的数据信号以及 PDH 系列异步电路传输信号、同步数据信号（64 kb/s，384 kb/s，ISDN 的 2B+D，30B+D）及宽带交换信号（如异步转移模式 ATM 信号），还有 LAN（局域网），MAN（城域网）计算机网信号和图像信号等。

2. 通道层

通道层主要实现使不同类型电路层信号通过接口进入 SDH 终端的功能。其步骤是首先通过适配进入虚容器处理后在高阶复用汇合，并提供通道连接和通道监视等功能。

3. 传输媒质层

传输媒质层又分为段层和物理媒体层，其含义如图 5-12 所示。

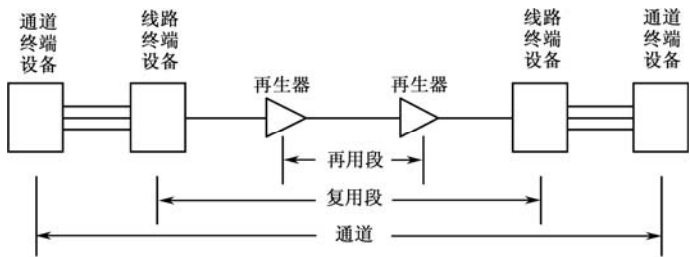


图 5-12 再生段、复用段及通道意义的图解

(1) 段层可分为复用段层和再生段层，复用段、再生段含义可由图 5-12 解释。其中，复用段层为通道层提供同步和复用功能，完成复用段开销 MSOH 处理和传递；再生段层获得再生器与复用段终端之间的信息传递，如定帧、扰码、解扰、再生段误码监测、再生段开销 RSOH 处理、监视和传递等。

(2) 物理媒质层可分为光纤、电缆、微波和卫星传输媒体。

光纤传输媒质是最适合于传送 SDH 信号的传输媒质，因此称用光纤线路传输 SDH 信号为“光同步传输体系”。ITU-T 对 SDH 光接口有较全面的要求，规范了很多对 PDH 系统未曾标准化的光参数。

电缆传输媒质有同轴电缆传输的 SDH 网络，如 STM-1 低速率的网络，以及在局内或近距离也采用 75 Ω 同轴电缆的传输媒质。数字微波与卫星的 SDH 网络虽然是基于光纤来设计的，但为了地面和空间传输通道互为备用，CCIR 规范了数字微波与卫星 SDH 系统，是速率为 155.520 Mb/s 和 622.080 Mb/s 的传输系统。

当分层概念引入 SDH 传送网之后，可将传送网划分为若干网络层，这样使传送网的结构更加清晰，但每一网络层的结构仍很复杂，为了便于管理，又在分层结构的基础上，再从水平方向将每一层网络分为若干子网和更小的子网，如图 5-13 所示，这就是分割。所谓“子网”就是将某些由光纤连接在一起的网元和光缆链路构成的集合，称为子网。任何子网都可以进行进一步分割，分割成为由链路相互连接的较小的子网，而这些较小的子网和与之相连接的链路便构成子网的拓扑。从另一角度来看，也可以认为正是在层网络中引入了

分割概念，从而可将任何层网络进行逐级分解直至观察到所需的细节为止。通常所观察到的最末端细节就是实现交叉连接功能的设备。

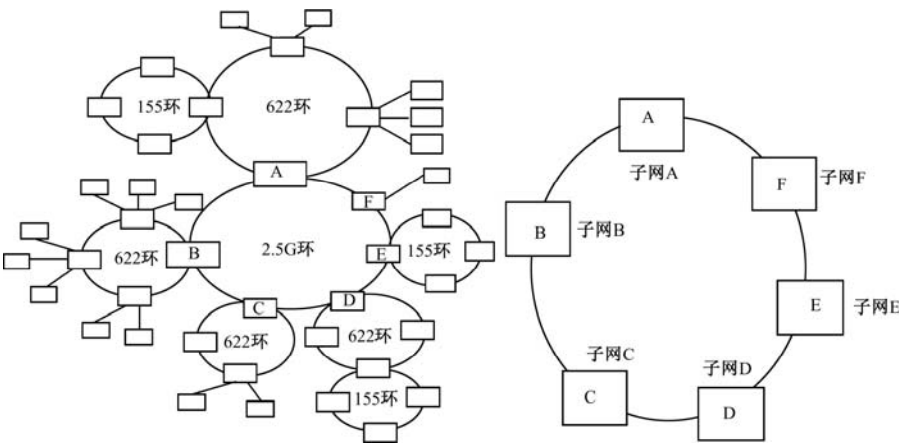


图 5-13 网络与子网关系

5.3.2 SDH网络结构

SDH 系统的巨大优越性，只有在组网时才能充分发挥出来。在以前的传统组网中，为提高传输设备利用率而增加线路占空比系数，网中的各节点（网元）都建立许多直达通路，使网络结构复杂，而 SDH 组网是由 SDH 网元设备通过光缆连接而成，采用优化网络结构，建立强大的运营、维护、管理（OAM）功能，降低传输费用，支持新业务。

SDH 网络拓扑的选择应综合考虑网络的生存性，网络配置的难易，网络结构是否适合新业务的引入等多种因素，根据具体情况来决定。一般来说，除了最简单的点到点物理拓扑外，网络拓扑有如图 5-14 所示的 5 种类型。

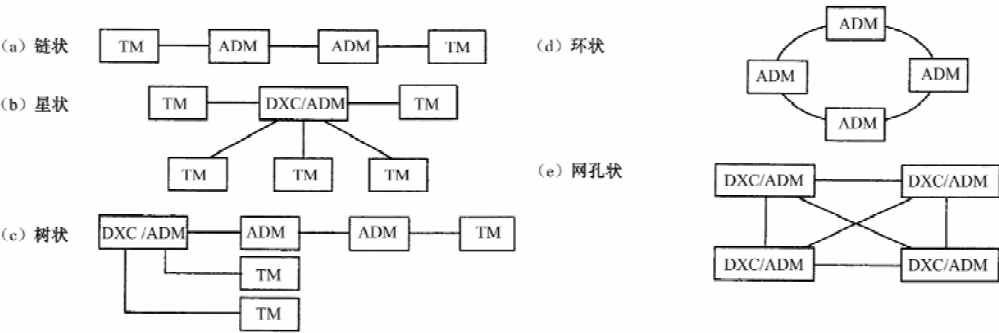


图 5-14 SDH 基本拓扑的结构

1. 链状

将通信网中的所有点串接起来，首末两点开放，便形成了线性拓扑。这是 SDH 早期应用的网络拓扑形式，首末两端使用终端器，中间各点使用分插复用器（ADM），便构成比较

经济的线状网。

2. 星状和树状

网中有一个特殊点以辐射的形式与其余所有点直接相连，而其余点之间互相不能直接相连，便构成了星状拓扑；当末端点连接到几个特殊点时就形成了树状拓扑。树状拓扑可以看成是线状和星状拓扑的结合。星状和树状都适合于广播式业务，但在特殊点存在着瓶颈问题、光功率预算限制和失效问题，这两种网络拓扑不适合提供双向通信业务。

3. 环状

将线状网首末两开放点相连便形成了环状网。在环状网中，为了完成两个非相邻点之间的连接，这两点之间的所有点都应完成连接功能。环状网的最大优点是具有很高的网络生存性，因而在 SDH 网中受到特殊的重视，在中继网和接入网中得到广泛的应用。

4. 网孔状

当涉及通信的许多点直接相连时就形成了网孔状拓扑，网孔状拓扑不受节点瓶颈问题的影响，两点间有多种路由可选，网络可靠性高。其缺点是网络结构复杂、成本较高，适合于业务量很大的干线网。

我国的 SDH 网络结构，一般都采用有自愈功能的环状网结构及少部分的点对点线状结构（一级干线），全国 SDH 系统组网分为 4 个层面，如图 5-15 所示。第 1 层即省级干线：它是最高层一级干线网络，主要用于省会、城市间的长途通信，由于其间业务量较大，因而一般在各城市的汇接节点之间采用 STM-64，STM-16 高速光链路，而在业务量大的各汇接节点城市装备 DXC4/4 设备，具有 STM-N 接口和 PDH 系列接口。从而形成一个以网孔状结构为主，其他结构为辅的大容量、高可靠性的骨干网。

第 2 层即省内干线，主要用于省内的长途通信。考虑其具体业务量的需求，通常采用网孔状或环状骨干网结构，有时也辅以少量线状网络，因而在主要城市装备 DXC 设备，其间用 STM-4 或 STM-16 高速光纤链路相连接，形成省内 SDH 网络结构。主要实现省内的骨干环状网（少量线状网），其主要汇接点有 DXC4/4 和 DXC4/1，有 PDH 的 2 Mb/s，34 Mb/s 和 140 Mb/s 接口，也有 SDH 系列接口，具有灵活的调度电路能力。

第 3 层即中继网，主要由长途端局与市话端局之间以及市话局之间通信的中继网构成。根据区域划分法，可分为若干个由 ADM 组成的 STM-1 或 STM-4 高速环路，也可以是用路由备用方式组成的两节点环，而这些环是通过 DXC4/1 设备来沟通，既具有很高的可靠性，又具有业务量的疏导功能。

第 4 层即接入网，这是网络的最低层面，既称为用户网，也可称为接入网。由于业务量较低，而且大部分业务量汇聚于一个节点（交换局）上，因而可以采用环状网络结构，也可以采用星状网络结构，其中是以高速光纤线路作为主干链路来实现光纤用户环路系统的互通，或者经由 ADM 或 TM 来实现与中继网的互通。速率为 STM-1 或 STM-4，接口可以为 STM-1 光/电接口。PDH 体系的 2 Mb/s，34 Mb/s 和 140 Mb/s 接口、普通电话用户接口、小交换机接口、2B+D 或 30B+D 接口以及城域网接口等。

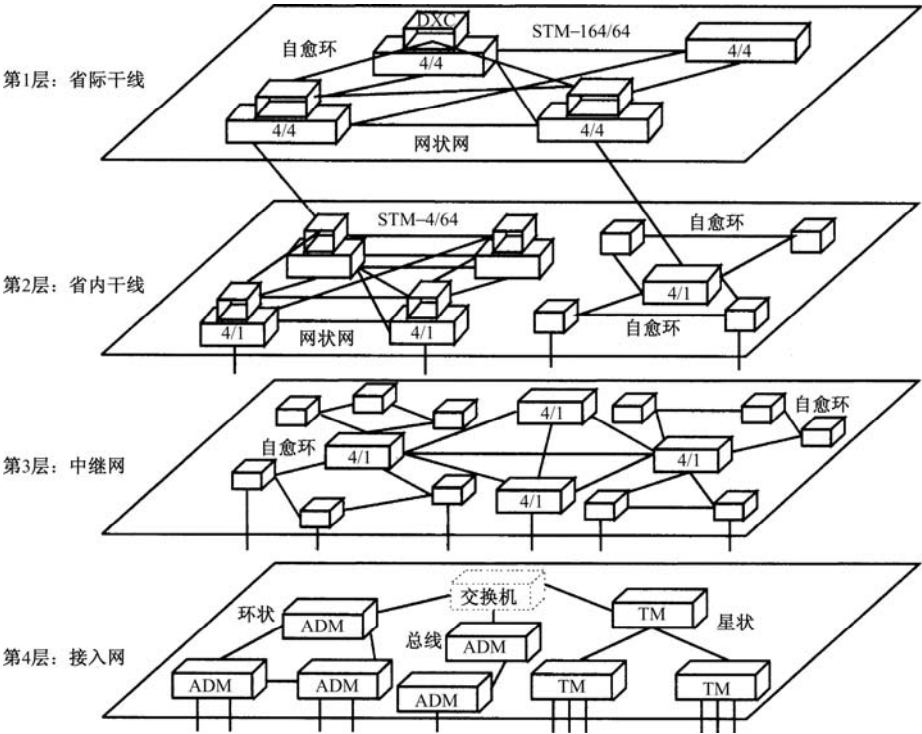


图 5-15 我国 SDH 网络结构

由于用户接入网是 SDH 网中最为复杂、最为庞大的部分，它占通信网投资的大部分，但为了实现信息传递的宽带化、多样化和智能化，因而用户网必须逐步向光纤化方向发展。这样才有光纤到路边（FTTC）和光纤到户（FTTM）的不同阶段，相信会在不久的将来逐步地完成由 PDH 到 SDH 的过渡以及 SDH 与 CATV 的一体化，开通多媒体业务，直至提供图像、电视和高清晰度电视等宽带业务。随着技术的不断进步，人们对业务量的要求逐步提高，SDH 网络结构有可能将 4 个层面逐渐简化为两个层面，即将一级和二级干线网融为一体，组成长途网；而将中继网与接入网融合成为本地网。

5.3.3 SDH网同步的概念

SDH 网中要解决的首要问题是网同步问题，因为要保证发端在发送数字脉冲信号时将脉冲放在特定时间位置上，而收端要能在特定的时间位置处将该脉冲提取解读以保证收发两端的正常通信。SDH 网络通常采用主从同步方式，实现网同步，其结构如图 5-16 所示。

1. 网同步的有关概念

- （1）“同步”是指时钟或信息在相应有效瞬间同时以同一平均速率出现，数字网的同步是指交换设备内的时钟，传输设备内的时钟之间的同步。
- （2）“网同步”概念是指网络中所有交换机节点的时钟频率和相位都控制在预先确定的容差范围内，以便使网内各交换节点的全部数字流实现正确有效的交换。同步问题实际上是时钟频率与相位问题，只有各节点时钟完全一致才能进行同步复用、解复用以及传输。

(3) “光同步数字传输网”是由若干满足同步 SDH 网络网元 (NE) 组成,它是在光纤上实现同步信息传输、复用和交叉连接的网络。

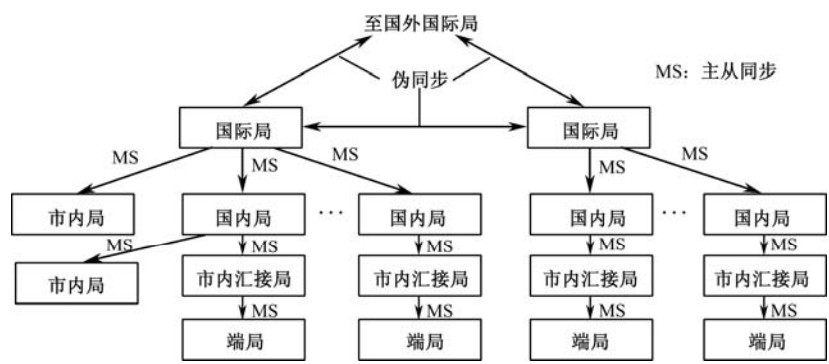


图 5-16 网同步的结构

2. 数字网同步的方式

解决数字网同步的方法有两种：“伪同步”和“主从同步”。

1) 伪同步

伪同步是指数字交换网中各数字交换局在时钟上相互独立,毫无关联。各数字交换局的时钟都具有极高的精度和稳定度,一般用铯原子钟。由于时钟精度高,网内各局的时钟虽不完全相同(频率和相位),但误差很小,接近同步,于是称之为伪同步。

一般伪同步方式用于国际数字网中,也就是一个国家与另一个国家的数字网之间采取这种同步方式,如图 5-16 所示。例如中国和美国的国际局均各有一个铯时钟,二者采用伪同步。

2) 主从同步

主从同步指网内在主局设一高精度时钟,网内各局均受控于该主局(即跟踪主局时钟,以主局时钟为定时基准),并且逐级下控,直到网络中的末端网元——终端局。主从同步方式一般用于一个国家、地区内部的数字网。

3) 主从同步原则

我国的同步网采用主从同步方式,按主从同步方式一般采用等级制,目前 ITU-T 将时钟精度分为四级。

(1) 一级时钟为全网定时基准主时钟 (PRC), 满足 G.811 建议规范,即铯原子钟精度 10^{-11} 。

(2) 二级时钟为转接局从时钟,满足 G.812 建议规范(本地局时钟)的铷原子钟精度为 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ 。

(3) 三级时钟为端局从时钟,也满足 G.812 建议规范。一、二、三级分配时钟采用树状拓扑结构,如图 5-17 所示。

(4) 四级时钟为数字小交换机 (PBX)、远端模块或 SDH 网元内置时钟,满足 G.813 建议规范即晶振精度 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 。

我国的 SDH 主从同步网也分为四级,即一个网络中只取一个节点(网元)为主时钟,

其余的为从时钟，从时钟要跟踪主时钟的频率及相位变化。

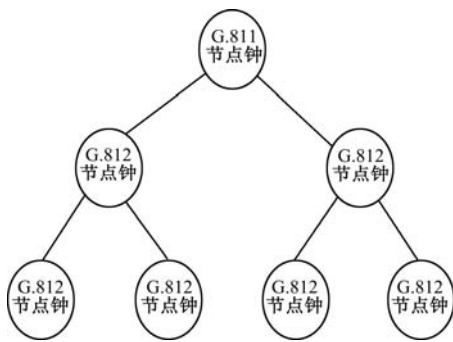


图 5-17 局间分配的同步网结构

4) SDH 时钟工作模式

(1) 正常工作模式，即跟踪锁定上级时钟模式。

(2) 保持模式，即当定时基准丢失，从时钟通过“记忆”提供与原基准较相符的定时信号。

(3) 自由振荡模式，即当从时钟丢失基准定时超过 24 h，从时钟内部振荡器就会工作于自由振荡方式。

5.3.4 SDH自愈环网原理

SDH 传输网中所采用的网络结构有多种，其中环状结构才具有真正意义上自愈功能，故称为自愈环。即网络在无需人为干预情况下，就能在极短时间内（ITU-T 建议小于 50 ms）从失效状态自动恢复所携带的业务，使用户感觉不到网络已出现了故障。其基本原理就是使网络具有备用路由，并重新确立通信能力。可见它特别适应大容量的光纤通信发展的要求，所以得到广泛的重视。当然自愈环只涉及到重新确立通信，而不管具体失效元部件的修复与更新，而后者仍需人为干预才能完成。下面介绍两种目前应用最为典型的自愈环。

1. 二纤单向通道保护（倒换）环

二纤单向通道倒换环的结构如图 5-18（a）所示，它采用 1+1 保护方式。若环网中网元 A 与 C 互通业务，网元 A 和 C 都将业务“并发”到环 S1 和 P1 上，S1 和 P1 上的所传业务相同且流向相反。在网络正常时，A→C 方向传送过程为：信息由网元 A 插入，一路由主环光纤 S1 携带，经 B 网元（节点）到达 C 节点，另一路由备环光纤 P1 携带，经 D 到达 C 网元，在网元 C 自动“选收”主环纤 S1 上的 A 到 C 的业务，完成网元 A 到网元 C 的业务传输。同理，C→A 方向传送过程为：当信息由网元 C 插入后，分别由主环光纤 S1 和备环光纤 P1 所携带，前者经网元 D，后者经网元 B，到达网元 A，在网元 A 仍然“选收”主环纤 S1 上的 C 到 A 的业务，完成网元 A 到网元 C 的业务传输。

当 B、C 节点间出现断纤故障时，如图 5-18（b）所示，由于网元 A、C 在环上业务的“并发”功能没有改变，也就是 S1 环和 P1 环上的业务还是一样的。这时网元 A 与网元 C 之间的业务是如何被保护的呢？网元 A 到网元 C 的业务由网元 A 并发到 S1 和 P1 光纤上，其中

P1 业务经网元 D 传至网元 C，S1 的业务经网元 B，由于 B 与 C 间光纤断了，所以光纤 S1 上的业务无法传到网元 C，此时网元 C 立即切换选收备环 P1 上的 A 到 C 的业务。于是 A 到 C 的业务得以恢复，完成环上业务通道保护。

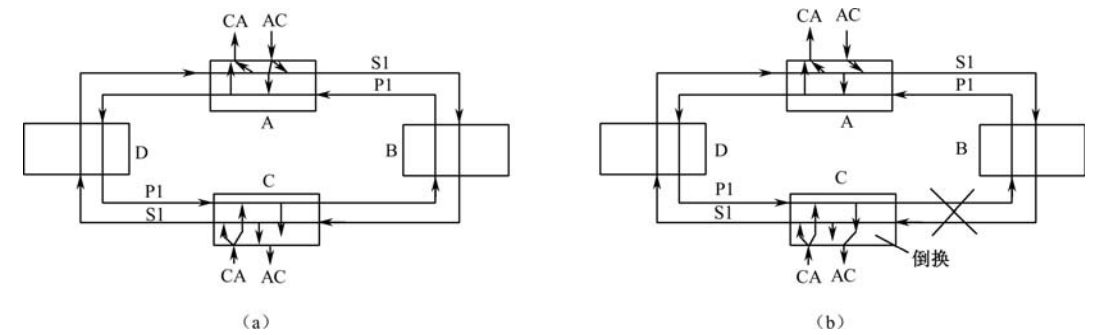


图 5-18 二纤单向通道保护（倒换）环

同样网元 C 到网元 A 的业务也是并发到 S1 环和 P1 环上，其中 P1 环上的 C 到 A 业务，由于 B 与 C 间光纤断了，所以无法传到网元 A，而 S1 环上的 C 到 A 业务经网元 D 传到网元 A 并未断纤，再加上网元 A 本身设置为默认选收主环 S1 上的业务，这时网元 C 到网元 A 业务并未中断，网元 A 不做保护倒换。

2. 二纤双向通道倒换环

在二纤双向通道倒换环上既可以采用 1+1 保护方式，也可以采用 1:1 保护方式。这里只介绍 1+1 保护方式。

在图 5-19（a）给出了采用 1+1 方式的二纤双向通道倒换环的结构示意图。从图中可以清楚地看出，在实现保护功能的两根光纤中，一根是用于传输业务信号，即为主环光纤 S，而另一根是用于传输保护信号的，即为备环光纤 P。下面仍用网元 A，C 间的业务传输为例，说明其工作原理。

正常工作情况下，当业务由网元 A 插入时，将被同时送入主用光纤 S1 和备用光纤 P1，其中 S1 纤中的信号，经过网元 B 到达 C，而 P1 纤中的信号则经过网元 D，最后也到达网元 C。网元 C 从 S1 纤中选收信息。当信息由网元 C 插入时，同样将其同时送入主用光纤和备用光纤，前者中的信号经过网元 B 到达 A，后者中的信号则经过网元 D 到达 A，网元 A 也首先选收主用光纤中的信号。

当 B，C 节点之间的两根光纤同时出现断纤故障时，如图 5-19（b）所示，此时由网元 A 插入的信息，仍被同时送入 S1 和 P1，其中只有 P1 中的信号能够到达网元 C。由于无法从主用光纤中提取信息，此时在网元 C 立即切换到备环 P1 上选收的 A 到 C 的业务。于是 A 到 C 的业务得以恢复，完成环上业务通道保护。而由网元 C 插入的信息，仍被同时送到主用光纤 S2 和备用光纤 P2，其中只有备用光纤 P2 中的信号能够到达 A，因此 A 启动倒换开关，从备用光纤 P2 中提取信息，完成环上业务通道保护。

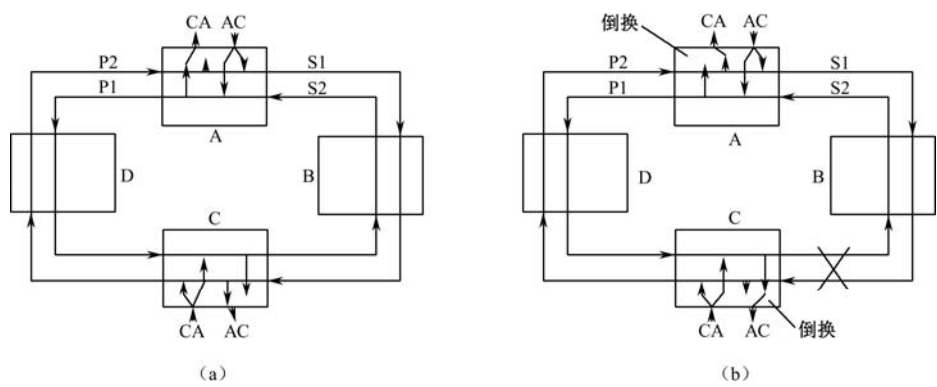


图 5-19 二纤双向通道倒换环

3. 二纤单向复用段倒换环

图 5-20 (a) 给出了二纤单向复用段倒换环的工作原理图。若环上网元 A 与网元 C 之间互通信息，构成环的两根光纤 S1，P1 分别称为主纤和备纤，传送信息不是 1+1 业务而是 1:1 业务，在正常情况下信号仅在主环 S1 上传输，而备环 P1 空闲或传输额外的其他信号。

在环路正常时信息在网元 A 插入，并由主纤 S1 传输，透明通过 B，到达 C，在 C 节点就可以从主纤 S1 中接收信息；从 C 到 A 的信息，由 C 插入，同样经主纤 S1 传输，经 D 到达 A，从网元 A 处由主纤 S1 接收信息。

当 B，C 网元间的光缆出现断纤故障时，如图 5-20 (b) 所示，在故障点的两网元 B，C，自动执行环回倒换功能，因而在网元 A 插入的信息，首先经 S1 纤传输到 B 点，由于 B 点环回到 P1 纤上，这时 P1 纤上的额外信息被清掉，传输网元 A 到网元 C 的主用信息，再经 A，D 网元穿过到达 C 点，由于网元 C 只从主纤 S1 提取主用信息，所以这时 P1 纤上的网元 A 到 C 主用信息在 C 点环回到 S1 纤中，再提取从 A 点插入的信息，从而完成 A 点到 C 点间的信息传递。而网元 C 到 A 点的主用信息仍是通过主用光纤 S1 经 D 点传输来完成。由此可见，这种环回倒换功能可以做到在出现故障情况下，不中断信息的传输，而当故障排除后，又可以启动倒换开关，恢复正常工作状态。

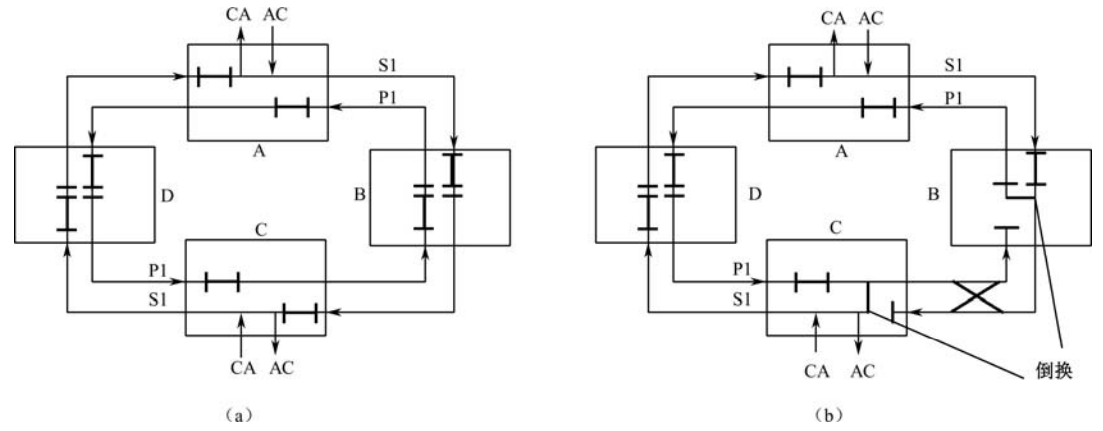


图 5-20 二纤单向复用段倒换环

4. 二纤双向复用段倒换环

从图 5-21 (a) 可见, S1 和 P2, S2 和 P1 的传输方向相同, 由此人们设想采用时隙技术, 将总时隙数一分为二, 前半时隙用于传送主用光纤 S1 的信息, 后半时隙用于传送备用光纤 P2 的额外信息, 这样可将 S1 和 P2 的信号置于一根光纤 (即 S1/P2 光纤), 同样 S2 和 P1 信号也可同时置于另一根光纤 (即 S2/P1 光纤) 上, 这样可以将四纤环简化为二纤环。

具体结构如图 5-21 所示。下面还是以网元 A, C 间的信息传递为例, 说明其工作原理。

正常工作情况下当信息由 A 插入时, 首先是由 S1/P2 光纤的前半时隙 (例如 STM-16 系统中前 1~8 个 STM-1) 所携带, 经 B 节点到 C 节点, 完成由 A 到 C 节点的信息传送, 而当信息由 C 节点插入时, 则是由 S2/P1 光纤的前半时隙来携带, 经 B 节点到达 A 节点, 从而完成 C 到 A 节点信息传递。当 B, C 节点间出现断纤故障时, 如图 5-21 (b) 所示, 由于光纤断线故障点相连的网元 B, C 都具有环回功能, 这样当信息由网元 A 插入时, 信息首先由 S1/P2 光纤的前半时隙携带, 到达 B 节点, 通过环回功能电路, 将 S1/P2 光纤前半时隙所携带的信息桥接装入 S2/P1 光纤的后半时隙, 此时 S2/P1 光纤 P1 时隙上的额外信息被冲掉, 然后, 经网元 A, D 传输到达 C, 在 C 处利用其环回功能电路, 又将 S2/P1 光纤中后半时隙所携带的信息置于 S1/P2 光纤的前半时隙之中, 从而实现网元 A 到 C 的信息传递, 而由 C 插入的信息则首先被送到 S2/P1 光纤的前半时隙之中, 经 C 节点的环回功能转入 S1/P2 光纤的后半时隙, 沿线经 D, A 到达 B, 又由 B 节点的环回功能处理, 将 S1/P2 光纤后半时隙中携带的信息转入 S2/P1 光纤的前半时隙传输, 最后到达网元 A, 以此完成由 C 到 A 的信息传递。

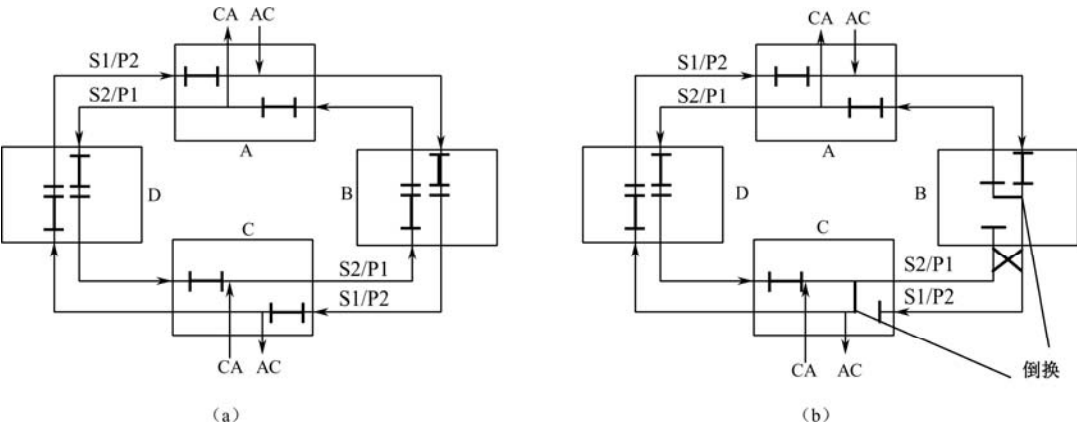


图 5-21 二纤双向复用段倒换环

5.3.5 SDH网络管理

1. SDH网络管理系统的组成

最常用的 SDH 网络管理建立由网管计算机 (包括软、硬件) 与 SDH 网络中网元 (NE) 的连接构成, 如图 5-22 所示。图 5-22 (a) 是用直连网线连接传输网络的一个网关网元的以太网接口, 图 5-22 (b) 是用 Modem 通过公用电话网连接传输网络中的多个网关网元的 X.25

接口，SDH 网元之间通过光纤保持连通。

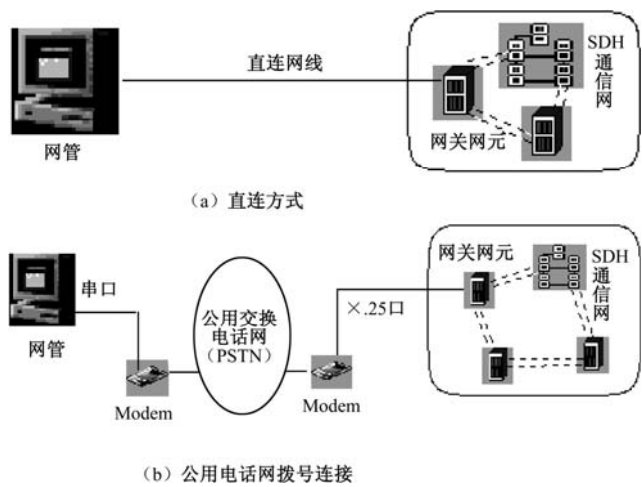


图 5-22 SDH 网络管理建立示意图

2. SDH网络管理一般功能

网络管理一般功能是嵌入控制通路的管理。为了 SDH NE 间能进行通信，必须对构成其逻辑通信链路的 ECC 进行有效的管理。其他一般功能，包括安全、软件下载、远端注册等。

- (1) 系统管理主要有：创建 SDH 网关/网元、数据库转储管理、日志管理等。
- (2) 配置管理：按 TMN 原理，主要实施对网络单元的控制、识别和数据交换。
- (3) 告警管理：有告警的查询、监视、自动上报、告警声响等故障诊断测试。
- (4) 性能管理：性能数据采集，按协议 G82X 规定的误码性能有关事件采集，这些事件是利用 SDH 帧结构中有关性能开销字节采集的。
- (5) 安全管理：安全管理涉及注册、口令和安全等级等。
- (6) 账目（计费）管理：账目管理涉及计费功能和资费功能。

3. SDH设备网管接口

SDH 网络管理主要有 Q 接口、F 接口、X.25，RS-232 和以太网口等。

5.4 基于SDH的多业务传送平台MSTP

所谓 MSTP 是指采用 SDH 平台，实现 TDM、ATM、以太网等业务的接入、处理和传送，提供统一网管的多业务节点接口。MSTP 可以将传统的 SDH 复用器、数字交叉连接器（DXC）、WDM 终端、网络二层交换机和 IP 边缘路由器等多个独立的设备集成为一个网络设备的处理单元，优化了数据业务对 SDH 虚容器的映射，从而提高了带宽利用率，降低了组网成本。MSTP 的关键点是除应具有标准 SDH 传送节点所具有的功能外，在原 SDH 上增

加了多业务处理能力,即具有以下主要功能特征。

(1) 具有 TDM 业务、ATM 业务或以太网业务的接入功能;

(2) 具有 TDM 业务、ATM 业务或以太网业务的传送功能,包括点到点的透明传送功能;

(3) 具有 ATM 业务或以太网业务的带宽统计复用功能;

(4) 具有 ATM 业务或以太网业务映射到 SDH 虚容器的指配功能。

基于 SDH 的多业务传送节点可根据网络需求应用在传送网的接入层、汇聚层,应用在骨干层的情况有待研究。

MSTP 是一种城域传输网技术,将 SDH 传输技术、以太网、ATM、POS 等多种技术进行有机融合,以 SDH 技术为基础,将多种业务进行汇聚并进行有效适配,实现多业务的综合接入和传送,实现 SDH 从纯传送网转变为传送网和业务网一体化的多业务平台。从传输网络现状来看,大部分的城域传输网络仍以 SDH 设备为主,基于技术成熟性、可靠性和成本等方面综合考虑,以 SDH 为基础的 MSTP 技术在城域网应用领域扮演着十分重要的角色。随着近年来数据、宽带等 IP 业务的迅猛增长, MSTP 技术的发展主要体现在对以太网业务的支持上,以太网新业务的要求推动着 MSTP 技术的发展。

城域网是当前电信运营商争夺的焦点,目前城域网组网技术种类繁多,大致包括基于 SDH 结构的城域网、基于以太网结构的城域网、基于 ATM 结构的城域网和基于 DWDM 结构的城域网。其实,SDH、ATM、Ethernet、WDM 等各种技术也都在不断吸取其他技术的长处,互相取长补短,既要实现快速传输,又要满足多业务承载,另外还要提供电信级的 QoS,各种城域网技术之间表现出一种融合的趋势。

MSTP 的实现基础是充分利用 SDH 技术对传输业务数据流提供标准化、保护恢复能力和较小的延时性能等方面的优势,并对网络业务支撑层加以改造,以适应多业务应用,实现对二层、三层的数据智能支持。在国内,1999 年提出这种 MSTP 新的传送网体系——诞生了多业务传送平台(Multi Service Transport Platform, MSTP)的概念,它能够很好地兼容 TDM 语音业务与数据业务,是网络发展的方向之一。

5.4.1 MSTP的功能块模型及优势

1. MSTP的功能块模型

MSTP 的功能块模型如图 5-23 所示。

1) PDH/SDH 接口

MSTP 节点提供标准的 PDH 和 SDH 接口,支持 VC12 /3 /4 级别的连续级联与虚级联,并对输入信号进行映射、复用和开销处理。

2) 以太网接口

来自以太网接口的数据帧对上层业务直接进行透明传输或可以选择在进入 VC 映射之前进行 2 层交换处理后,通过协议封装,映射至 VC 容器中,再加入复用段开销和再生段开销,最后形成 STM-N 的帧结构进行传送。2 层交换(可选功能)能基于端口、MAC 地址等方式划分 VLAN,并支持 STP (Spanning Tree Protocol)。

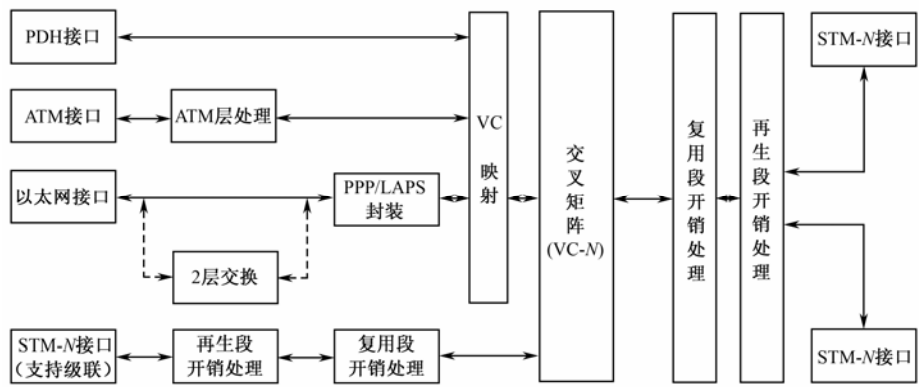


图 5-23 MSTP 功能块模型

对于以太网承载，应满足的透明性，映射封装过程应支持带宽可配置。在这个前提之下，是否进行二层交换。不论是否交换，对于二层交换功能，良好的实现方式应该支持如 STP、VLAN、流控、地址学习、组播等辅助功能。我国行业标准中规定可以选用三种以太网映射方式中的一种：LAPS 方式(ITU-T X.85)、PPP 方式(IETF 系列 RFC)、GFP 方式(ITU-T G.704)。

对于 ATM 接口，在映射入 VC 之前，提供 ATM 统计复用和 VP、VC 交换功能。对于宽带数据业务的映射，MSTP 还应该支持低阶和高阶的 VC 级联功能，包括相邻级联和虚级联。

以太网数据帧的封装采用以下几种方案：

一是通过点到点协议 PPP(Point to Point Protocol)转换成 HDLC 帧结构，再映射到 SDH 的虚容器中；二是将数据包转换成 LAPS(Link Access Procedure for SDH)帧结构映射到 SDH 虚容器 VC 中；三是通过 SDL(Simple Data Link)协议进行封装；四是通过 GFP(Generic Frame Procedure) 协议进行封装。

数据帧的映射采用 VC 通道的连续级联 (Contiguous Concatenation)、虚级联 (Virtual Concatenation) 或 ML-PPP (Multi-link Point to Point Protocol) 协议来保证数据帧在传输过程中的完整性。采用连续级联需所有相关节点支持该项功能。虚级联技术则将信号封装在几个标准的容器中，然后各自通过网络独立传送，最终在接收端将信号组合还原，从而实现带宽利用率的最优化。它与链路容量调整机制 (Link Capacity Adjustment Scheme, LCAS) 等技术配合，可以实现带宽的动态调整。以太网帧映射到 SDH 虚容器对应关系如表 5-2 所示。表中的 VC-4-Xc 表示相邻级联是把同一个 STM-N 中的 X 个相邻的 VC-4 级联成一个整体 VC-4-Xc，进行高速传输；而虚拟连接是把不同 STM-N 中的 VC-4 级联成一个虚拟大结构 VC-4-Xv 进行传输。表中其他内容按前面的解释类推。

表 5-2 以太网映射到 SDH 虚容器对应关系

以太网接口带宽	SDH 映射单位
10/100Mb/s 自适应接口	VC-12-Xc/v, VC-3, VC-3-2c/v, VC-4
1000Mb/s 接口	VC-4-4c/v, VC-4-8c/v, VC-4-Xc/v

3) ATM 接口

提供 CBR（恒定比特率）业务、实时 VBR（可变比特率）业务、非实时 VBR 业务和 UBR（不定比特率）等业务，支持 VP/VC（交换、永久虚电路（PVC）连接与 ATM 组播。MSTP 系统还能提供统计复用功能，可对多个 ATM 业务流中的非空闲信元进行抽取，复用进一个 ATM 业务流，从而节约了 ATM 交换机的端口数，提高了 SDH 通道的利用率。

2. MSTP 的优势

MSTP 主要优势有：

(1) 业务的带宽灵活配置，MSTP 提供 10/100/1000Mb/s 系列接口，通过 VC 的捆绑可以满足各种用户的需求。现阶段大量用户的需求还是固定带宽专线，主要是 2Mb/s、10/100Mb/s、34Mb/s、155Mb/s。对于这些专线业务，大致可以划分为固定带宽业务和可变带宽业务。对于固定带宽业务，MSTP 设备从 SDH 那里集成了优秀的承载、调度能力；对于可变带宽业务，可以直接在 MSTP 设备上提供端到端透明传输通道，充分保证服务质量，可以充分利用 MSTP 的二层交换和统计复用功能共享带宽，节约成本，同时使用其中的 VLAN 划分功能隔离数据，用不同的业务质量等级（QoS）来保障重点用户的服务质量。

(2) 可以根据业务的需要，工作在端口组方式和 VLAN 方式，其中 VLAN 方式可以分为接入模式和干线模式；而端口组方式：单板上全部的系统端口均在同一个端口组内，这种方式只能应用于点对点开的业务。换句话说，也就是任何一个用户端口和任何一个系统端口被启用了，网线插在任何一个启用的用户端口上，那个用户口就享有了所有带宽，业务就可以开通。

(3) 可以工作在全双工、半双工和自适应模式下，具备 MAC 地址自学习功能。

(4) QoS 设置。QoS 实际上限制端口的发送，原理是发送端口根据业务优先级上有许多发送队列，根据 QoS 的配置和一定的算法完成各类优先级业务的发送。因此，当一个端口可能发送来自多个来源的业务，而且总的流量可能超过发送端口的发送带宽时，可以设置端口的 QoS 能力，并相应地设置各种业务的优先级配置。当 QoS 不作配置时，带宽平均分配，多个来源的业务尽力传输。

(5) 对客户独立运行生成树协议。

(6) 在城域汇聚层，实现企业网络边缘节点到中心节点的业务汇聚，具有节点多、端口种类多、用户连接分散和较多端口数量等特点。采用 MSTP 组网，可以实现 IP 路由设备 10M/100M/1000M POS 和 2M/FR 业务的汇聚或直接接入，支持业务汇聚调度，综合承载，具有良好的生存性。根据不同的网络容量需求，可以选择不同速率等级的 MSTP 设备。

5.4.2 MSTP 技术应用

MSTP 技术在现有城域传输网络中备受关注，得到了规模应用，它的技术优势与其他技术相比在于：解决了 SDH 技术对于数据业务承载效率不高的问题；解决了 ATM/IP 对于 TDM 业务承载效率低、成本高的问题；解决了 IP QoS 不高的问题；解决了 RPR 技术组网

限制问题，实现双重保护，提高业务安全系数；增强数据业务的网络概念，提高网络监测、维护能力；降低业务选型风险；实现降低投资、统一建网、按需建设的组网优势；适应全业务竞争需求，快速提供业务。

MSTP 技术支持点对点传输以太网的 MSTP 组网，其典型组网方案可如图 5-24 所示；MSTP 提供的 10Mb/s/100Mb/s/1000Mb/s 系列接口，解决了以太网承载的瓶颈问题，给网络建设带来了充分的选择空间；城域之间的业务汇聚点往往比较多，为了提高频带利用率，需要在 MSTP 中使用二层交换功能。

MSTP 技术支持 ATM 业务高效复用，通过现有城域网利用 ATM 交换机或者专门的 ATM 集中器复用 ATM 码流；由于城域传送网对 ATM 业务采取透明传输的方式，通过城域网在局端汇聚 ATM 业务，通常将 ATM 集中器的统计复用和汇聚功能放在城域传送网的每一个节点处进行处理，如图 5-24 所示。

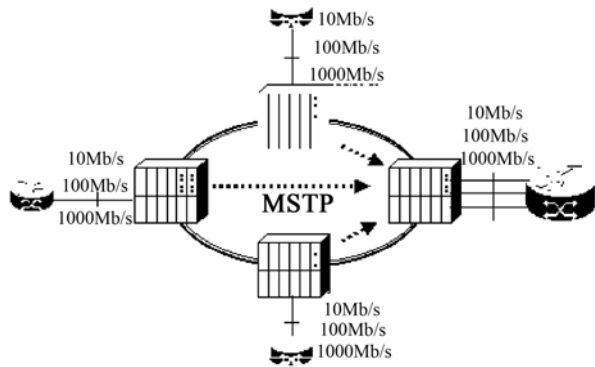


图 5-24 点对点传输以太网的 MSTP 组网

习 题

1. 比较 PDH 与 SDH 在特点上的差异。
2. 画出从 2 Mb/s 速率到 SDH 的 STM-1 复用映射结构。
3. 解释 SDH 帧结构中，信息净负荷区、段开销区、管理单元指针的主要作用。
4. 解释 SDH “网同步”、“伪同步”和“主从同步”概念。
5. SDH 网络的基本网元有哪些？并解释其主要功能。
6. 计算 STM-4 段开销的比特率、信息净负荷的比特率。
7. 已知二纤单向通道保护自愈环和二纤双向复用段保护自愈环，如图 5-25 所示。A,B,C,D 均为 ADM 光节点，若 C, D 两点之间光纤断裂，试分别写出两种自愈环 A 与 C 两点之间的业务流向来说明此自愈环的保护原理。

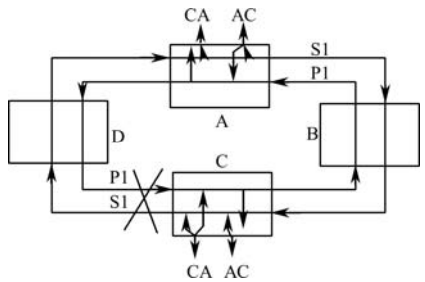


图 5-25 STM-4 二纤自愈环

- 8. 解释 MSTP 的多业务处理能力主要功能特征。
- 9. 简述 MSTP 的功能块模型主要功能及优势。

第 6 章 DWDM/WDM光传输网络

为了满足多种宽带业务（会议电视、高清晰度电视等）对传输容量和网络交互性、灵活性的要求，在光纤传输网上，产生了多种复用技术，如空分复用，即铺设大芯数新光缆，然而，铺设新光缆并不是增加信息传输容量的最好办法。考虑到漫长的线路铺设周期，昂贵的成本，铺设新光缆仅仅在不存在光纤线路的情形下才是最有效的。采用时分复用，在现有光纤线路基础上使用更高比特率的时分多路复用系统是扩大容量的方法之一，从 PDH 到 SDH 的发展就是例证，更高比特率（如 40Gb/s）的时分多路复用系统也在研究中，但是制造数十吉比特速率的电子线路将会遇到很多困难。另一扩容的重要方法是采用光波分复用，即将多个不同光波长的光纤通信系统合在一根光纤里传输，这些不同波长的光信号所承载的可以是不同速率、不同格式或不同种类的信号，从而大大提高了信息传输容量。

光波分复用技术可使原来只能采用一个波长的光作为载波的单一光信道变为数个不同波长的光信道同时在光纤中传输，因而光纤通信的容量能够成倍提高。此外利用光波分复用技术还可以实现单纤全双工传输（双向），从而在光纤网中增加组网的灵活性。目前在光纤传输网中商用的大多为密集波分复用（DWDM）系统，最大容量已达 32×10 Gb/s 和 40×10 Gb/s。在实验室已达到 132×20 Gb/s。

6.1 DWDM系统构成模型

6.1.1 波分复用基本概念

1. 波分复用定义

把不同波长的光信号复用到一根光纤中进行传输（每个光波长承载一个 TDM 电信号或模拟电信号等）的方式统称为波分复用，有时还将波分复用细分为波分复用（WDM）、粗波分复用（CWDM）和密集波分复用（DWDM）。WDM 是指光纤不同低损耗窗口的光波即 1310 nm 和 1550 nm 波长复用。CWDM 是指相邻波长间隔较大的 WDM，相邻信道的间距一般大于等于 20 nm，波长数目一般为 4 波或 8 波，最多 16 波。CWDM 使用 1200 nm~1700 nm 窗口。CWDM 在 O 波段有：1290 nm，1310 nm，1330 nm，1350 nm；E 波段有：1380 nm，1400 nm，1420 nm，1440 nm；S+C+L 波段共有 8 个波长；从 1470 nm 到 1610 nm，波长间隔 20 nm。DWDM 是指光纤同一低损耗窗口的相邻波长间隔较小（0.8 nm~10 nm 量级）的多个光波复用，图 6-1 为波长复用频谱图。

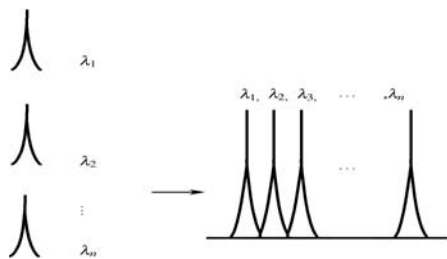


图 6-1 波长复用频谱图

2. WDM、CWDM和DWDM相邻波长间隔的区别

WDM、CWDM 和 DWDM 的主要区别在于复用与解复用时波长间隔不同。WDM 复用的波长间隔 $\Delta\lambda<200\sim250\text{ nm}$ ；CWDM 复用波长间隔 $\Delta\lambda<10\sim20\text{ nm}$ ；DWDM 复用的波长间隔 $\Delta\lambda=0.8\text{ nm}$ （约 100 GHz）或 1.6 nm（约 200 GHz）。

16/32 个波长通道 DWDM 系统对应的中心波长和频率，如表 6.1 所示。

表 6.1 16 波长和 32 波长 DWDM 系统中心波长/频率

序 号	频率/（THz）	波长/（nm）	序 号	频率/（THz）	波长/（nm）
01	192.1	1 560.61	17	193.7	1 547.72
02	192.2	1 559.79	18	193.8	1 546.92
03	192.3	1 558.98	19	193.9	1 546.12
04	192.4	1 558.17	20	194.0	1 545.32
05	192.5	1 557.36	21	194.1	1 544.53
06	192.6	1 556.55	22	194.2	1 543.73
07	192.7	1 555.75	23	194.3	1 542.94
08	192.8	1 554.94	24	194.4	1 542.14
09	192.9	1 554.13	25	194.5	1 541.35
10	193.0	1 553.33	26	194.6	1 540.56
11	193.1	1 552.52	27	194.7	1 539.77
12	193.2	1 551.72	28	194.8	1 538.98
13	193.3	1 550.92	29	194.9	1 538.19
14	193.4	1 550.12	30	195.0	1 537.40
15	193.5	1 549.32	31	195.1	1 536.61
16	193.6	1 548.51	32	195.2	1 535.82

6.1.2 DWDM在传输网中的定位

DWDM 能在一根光纤上同时传送多个携带有信息（模拟或数字）的光载波，可以承载 SDH 业务、IP 业务、ATM 业务，是一种只需通过增加波长（信道）来实现系统扩容的光纤通信技术。它将几种不同波长的光信号组合（复用）起来传输，传输后将光纤中组合的光信号再分离开（解复用），送入不同的通信终端，即在一根物理光纤上提供多个虚拟的光纤

通道，也可称之为虚拟光纤。DWDM 在系统中的位置如图 6-2 所示。

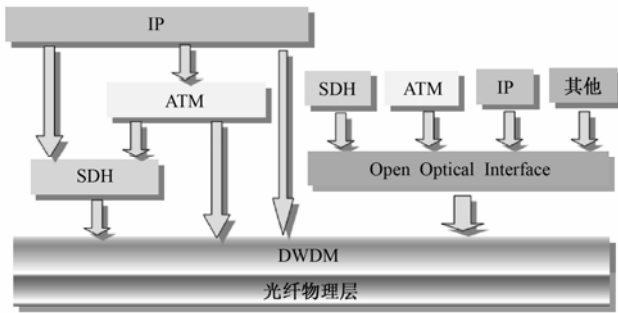


图 6-2 DWDM 在传输网中的位置

6.1.3 DWDM系统构成模型

DWDM 系统的构成主要有以下两种形式。

1. 二纤单向DWDM系统组成

二纤单向 DWDM 传输是指所有波长的光通路同时在一根光纤上沿同一方向传输，二纤单向 DWDM 系统原理如图 6-3 所示。在发送端将载有各种信息的、具有不同波长的已调光信号 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ，通过光复用器组合在一起，并在一根光纤中单向传输，由于各种信号是通过不同光波长携带的，因而彼此之间不会混淆。在接收端通过光解复用器将不同波长的光信号分开，完成多路光信号传输的任务，反方向通过另一根光纤传输的原理与此相同。

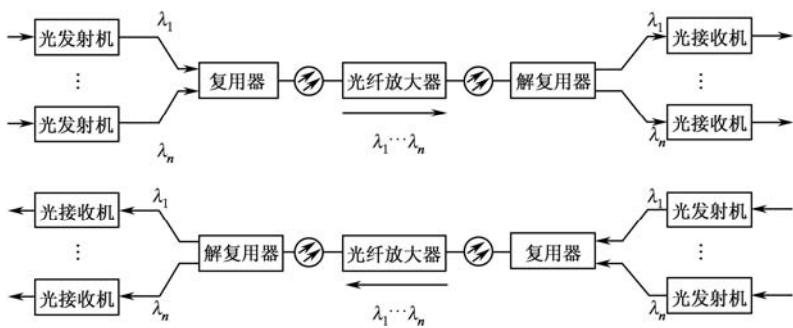


图 6-3 二纤单向 DWDM 系统原理图

2. 单纤双向DWDM系统组成

单纤双向 DWDM 传输是指光通路在一根光纤上同时向两个不同的方向传输，其系统原理如图 6-4 所示，所用波长相互分开，以实现双向全双工的通信。

双向 DWDM 系统在设计和应用时要考虑几个关键的系统因素，如为了抑制多通道干扰（MPI），应该注意到光反射的影响、双向通路之间的隔离、串扰的类型和数值、两个方向传输的功率电平值和相互间的依赖性、光监控信道（Optical Supervisory Channel，OSC）传输

和自动功率关断等问题，同时要使用双向光纤放大器。所以双向 DWDM 系统的开发和应用相对说来要求较高，但与单向 DWDM 系统相比，双向 DWDM 系统可以减少使用光纤和线路放大器的数量。

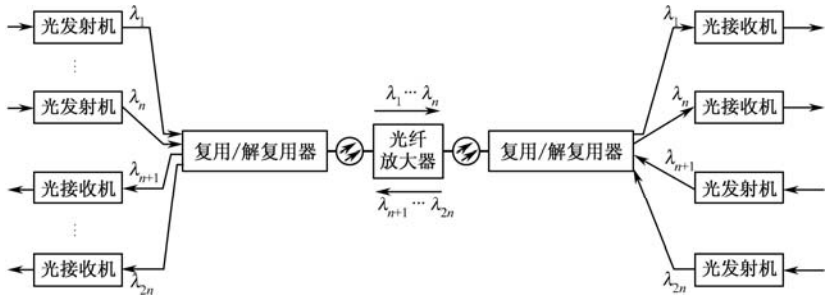


图 6-4 单纤双向传输的 DWDM 系统原理图

6.1.4 实用DWDM系统的构成

实用 DWDM 系统主要由 5 部分组成：光发射机、光中继放大、光接收机、光监控信道和网络管理系统，如图 6-5 所示。其简单工作过程是，首先把 1~n 个来自终端设备（如标准的 SDH 信号、ATM 信号、Ethernet 信号终端等）的光信号送到 DWDM 系统的光发射机的前端口。若该终端设备的光信号满足 ITU-TG.692，可越过光转发器（Optical Transponder Unit, OTU），若该终端设备的光信号不满足 G.692，则利用 OTU 把符合 ITU-T G.957 建议的非特定波长的光信号转换成符合 ITU-T G.692 建议的具有稳定的特定波长的光信号，如图 6-6 所示。OTU 对输入端的信号波长没有特殊要求，可以兼容任意厂家生产的设备输出的 SDH 信号、ATM 信号、Ethernet 信号，其输出端满足 G.692 的光接口，即采用标准的光波长和满足长距离传输要求的光源，再利用合波器合成多路光信号，通过光功率放大器（OBA）放大后输出多路光信号，送入光纤信道的同时插入光监控信号。

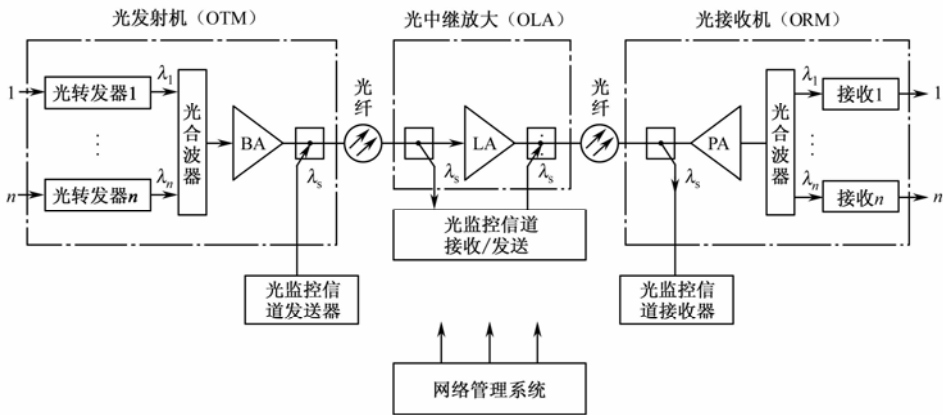


图 6-5 实用点对点 DWDM 系统的基本结构

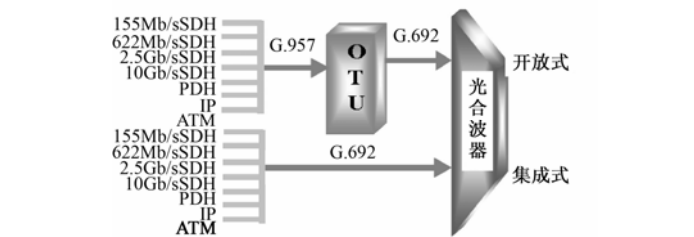


图 6-6 OTU 的定位

传输一定距离后，要用 EDFA 对光信号进行中继放大。在应用时可根据具体情况，将 EDFA 用做“线放（OLA）”、“功放（OBA）”或“前放（OPA）”。在 DWDM 系统中，对 EDFA 要采用增益平坦技术，使得 EDFA 对不同波长的光信号具有接近相同的放大增益。同时，还应对 EDFA 采取自动增益控制措施，以防信道跌落时导致的“浪涌”现象。

在光接收机，先将光监控信号与业务信号分离，然后把经长途衰减了的主业务弱光信号（1530~1556 nm）进行前置放大器（OPA），由分波器从业务信道中分出各种波长的光信号送入接收机。接收机不仅要满足灵敏度、过载功率等参数的要求，还要能承受有一定光噪声的信号，要有足够 O/E 的电带宽特性。

光监控信道（OSC）主要用以监控系统内各信道的传输情况，在光发送机，插入本节点产生的波长为 λ_s （1310 nm 或 1480 nm 或 1510 nm+10 nm）光信号，与主信道的光信号合波输出；在光接收机，将接收到的监控光信号分离，分别输出 λ_s 波长的光监控信号和业务信道光信号，如图 6-7 所示。

OSC 的信息帧结构两种：一是码型为 CMI、工作速率为 2Mb/s 的监控系统，利用 32 个 64kb/s 字节承载各种监控信息，并以 PCM32 帧格式传递与交换。二是采用 4B/5B 编码、速率为 10Mb/s 和 100Mb/s 的监控系统，以中兴通讯的 DWDM 设备为例，监控通道采用 10/100Mb/s 以太网技术，将各种数据以 IP 数据包的形式封装，并在以太网数据帧中传递与交换。

光监控信号在整个传输中没有参与放大，但每个站点都被终结和再生，重新发送。光波分复用的帧同步字节、公务字节和网管所用的开销字节等都是通过光监控信道来传输的。

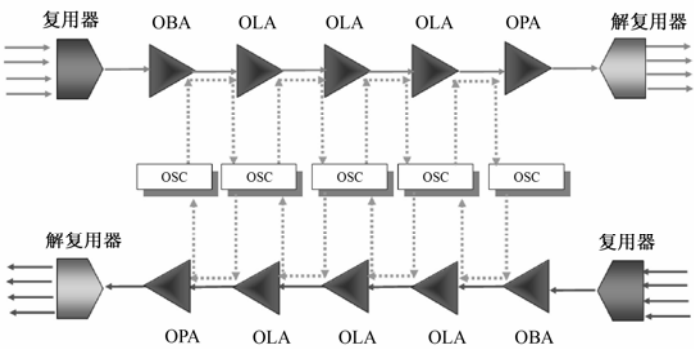


图 6-7 业务信道与监控信道的分离

网络管理系统通过光监控信道物理层传输开销字节到其他节点或接收来自其他节点的开销字节对 DWDM 系统进行管理, 实现配置、故障、性能和安全管理等功能, 并与上层管理系统 (如 TMN) 相连。

目前国际上已商用的系统有 4×2.5 Gb/s, 8×2.5 Gb/s, 16×2.5 Gb/s, 40×2.5 Gb/s, 32×10 Gb/s, 40×2.5 Gb/s。实验室已实现了 82×40 Gb/s 的速率, 传输距离达 300 km。据 OFC2000 (Optical Fiber Communication Conference) 提供的情况, 主要的商用系统设备有以下 5 种。

(1) Bell Labs: 82×40 Gb/s 在 3×100 km=300 km 的 True Wave (商标) 光纤 (即 G.655 光纤) 上, 利用 C 和 L 两个波带联合传输;

(2) 日本 NEC: 160×20 Gb/s, 利用归零信号沿色散平坦光纤, 经过增益宽度为 64nm 的光纤放大器, 传输距离达 1500 km;

(3) 日本富士通: 128×10.66 Gb/s, 经过 C 和 L 波带 (C 波带为 1525~1565 nm; L 波带为 1570~1620 nm), 用分布拉曼放大 (Distributed Raman Amplification, DRA), 传输距离达 6×140 km=840 km;

(4) 日本 NTT: 30×42.7 Gb/s, 利用归零信号, 经过增益宽度为 50 nm 的光纤放大器, 传输距离达 3×125 km=375 km;

(5) 美国 Lucent Tech: 100×10 Gb/s, 各路波长的间隔缩小到 25 GHz, 用 L 波带, 沿 G.655 光纤传输 400 km。

6.1.5 DWDM系统的主要器件

如图 6-5 所示, DWDM 系统的主要器件有: 光转发器 (OTU)、光合波器/分波器、光纤放大器, 其中光合波器/分波器与光纤放大器在第 3 章已介绍了, 这里主要介绍 OTU 原理及功能。

光转发器 (OTU) 或称波长转换器 (Wavelength Conversion, WC), 其功能是将输入某一波长光信号转换为需要的另一个或同一波长上。要实现波长变换有两类方法, 采用光/电/光变换方式的波长转换器是最简单的, 也是目前唯一成熟的方法。其特点既要对波长进行变换又要对光信号进行整形, 用在 DWDM 系统是很有效的, 缺点是结构复杂, 功耗大, 不保持光路的透明性, 从而促使人们研究光/光变换方式。光/光变换方式的波长转换器是基于半导体光放大器 (SOA) 的交叉增益调制 (Cross Gain Modulation, XGM) 或交叉相位调制 (Cross Phase Modulation, XPM) 等方法构成的, 有效地实现全光波长变换, 其优点是响应速度快、易于集成, 但目前尚无商用。

1. 光/电/光变换的 OTU

一种是没有定时再生电路的 OTU, 实际上由一个光 / 电转换器和一个高性能的电/光转换器构成, 原理框图如图 6-8 所示。其工作过程是先用光电二极管 PIN 或 APD 把收到光信号, 实现 O/E 转换, 然后将电信号调制到所需标准波长的激光器发射出去, 实现 E/O 转换, 从而实现波长转换。没有定时再生电路的 OTU 适用于传输距离较短, 仅以波长转换为目的的情况。

另一种是有定时再生电路的 OTU, 是在光/电转换器和电/光转换器之间增加了一个定

时再生功能块，对所接收到的信号进行了一次整形，实际上兼有 REG 的功能，原理框图如图 6-9 所示。

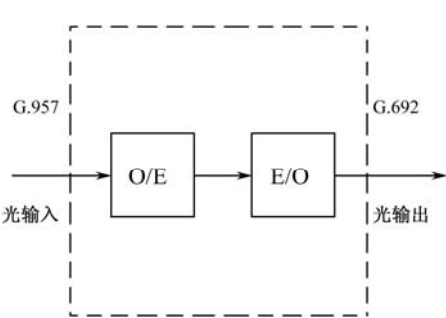


图 6-8 没有定时再生电路的 OTU

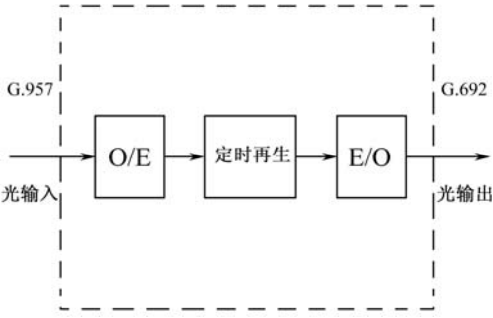


图 6-9 有定时再生电路的 OTU

2. 光/光变换的OTU

图 6-10 是 SOA-XGM 型 OTU 结构。信号光（波长为 λ_s ）和连续光（变换所需的光波长 λ_c ）同时入射到 SOA 中时，信号光强的变化将使 SOA 的增益发生变化。当信号光强度增加为“1”码时，SOA 的增益变小（增益饱和），而当信号光强度减少为“0”码时，SOA 的增益加大（非增益饱和），这样信号光对 SOA 的增益实施了调制，将使连续光的强度也随 SOA 的增益而变化，从而使所载信号转移到连续光的振幅上去。在输出既有原信号波长的光，又有被调制的连续光波长，故需要一个光滤波器滤出原信号波长 λ_s 。由于采用了增益饱和和效应，所以通过波长变换后的信号与原信号是相反的。图 6-10（a）和图 6-10（b）为常见的两类 SOA-XGM 型 OTU。

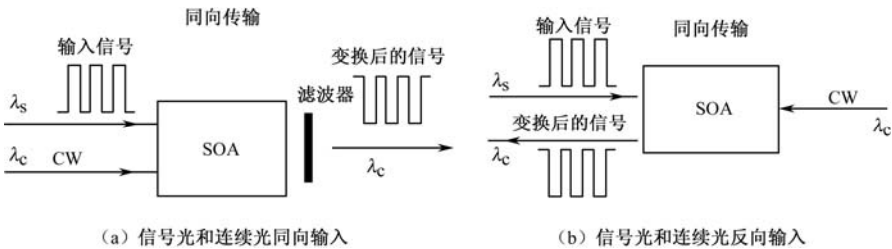


图 6-10 基于 SOA 的 XGM 型全光波长变换器

图 6-11 是 SOA-XPM 型 OTU，采用的是 M-Z 结构。SOA-XPM 型 OTU 的基本原理是光强度对折射率形成调制。由于入射信号光在有源区感应受激辐射、消耗载流子，从而引起载流子浓度发生变化，而载流子浓度的变化又引起折射率变化，进而使输入的连续光的相位得到调制。M-Z 干涉仪两臂上的相位调制信号在第二个耦合器上进行相干叠加，将相位信息转换为强度信息，达到波长变换的目的。

3. OTU的应用

没有定时再生电路的 OTU 往往被应用于开放式 DWDM 系统的入口边缘，将常规光源发出的非标准波长的光转换成符合 ITU-T G.692 规定的波长，图 6-12 是一个实际使用的实例。

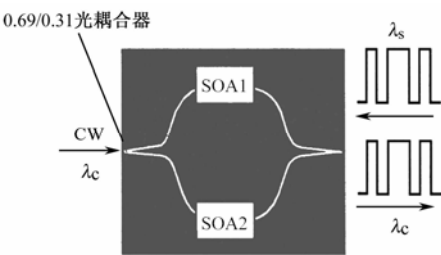


图 6-11 M-Z 非对称结构

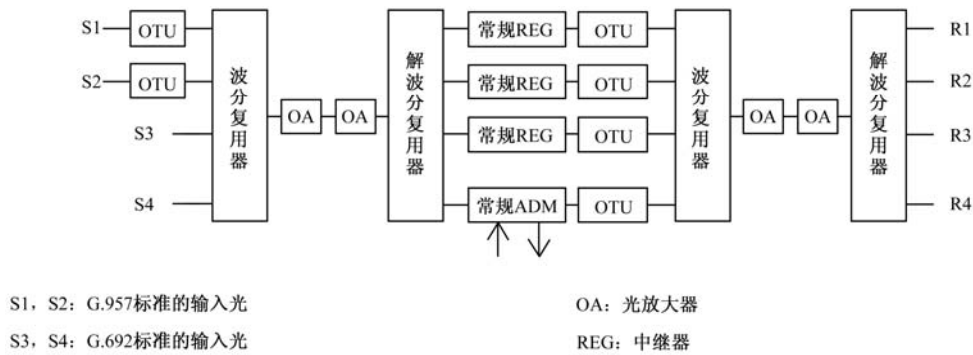


图 6-12 没有再生中继功能的 OTU 应用实例

有定时再生电路的 OTU 在进行波长转换的同时，还可以进行信号整形，抑制噪声，提高光功率，可以被置于数字段之上，作为常规再生中继器（REG）使用，简化网络。图 6-13 是一个实际使用的实例。

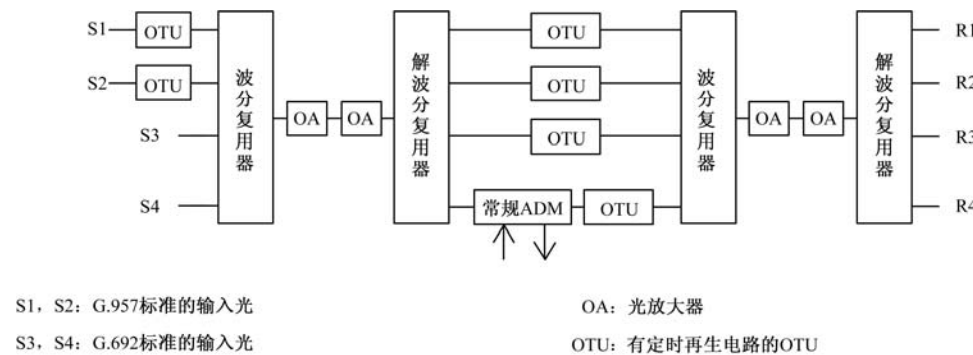


图 6-13 OTU 作为再生中继器的应用实例

由于两种 OTU 的作用略有区别，故原邮电部电信总局的《技术规范书》中，对两种 OTU 光接口的参数要求稍有差别，没有再生中继功能的 OTU 的光接收灵敏度为 -18 dBm，过载功率为 0 dBm；有再生中继功能的 OTU 光接收灵敏度为 -28 dBm，过载功率为 -9 dBm。

6.2 DWDM基本网络单元设备

DWDM 基本网络单元设备，一般按用途可分为：光终端复用设备（OTM），光线路放大设备（OLA）、光分插复用设备（OADM）和光交叉连接设备（OXC）4 种类型。本节分别简单介绍它们的基本结构及功能。

如图 6-14 所示是实用的 16 波 DWDM 系统，它由两个 OTM 组成，在两个 OTM 之间由一对光纤和一个 OLA 相连，在距离较长的传输线路中，可以在线路中间增加多个 OLA 以提供跨距离长传输。

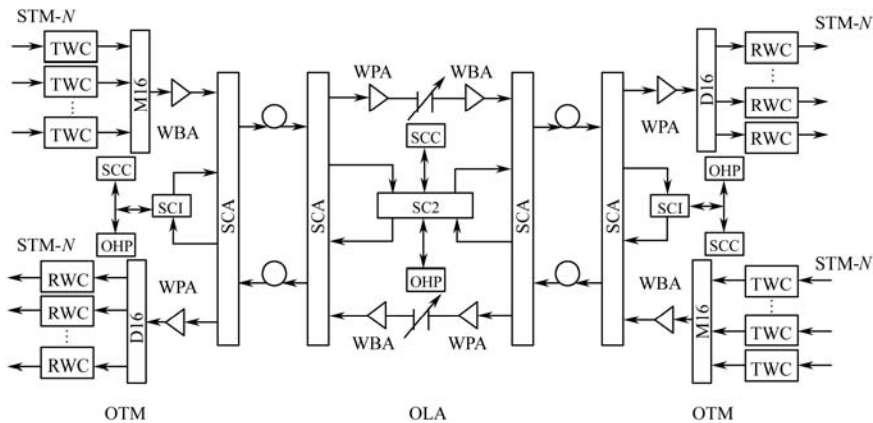


图 6-14 实用的 16 波 DWDM 系统组成

6.2.1 光终端复用设备（OTM）

DWDM 网络中最重要的网元之一是 OTM，这里以图 6-14 所示的 16 波 DWDM 系统为例，介绍其功能。

OTM 的主要任务是来自各终端设备（如 SDH 的 TM）输出的光信号 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{16}$ ，分别利用发送端波长转换器（TWC），把非特定波长的光信号转换成符合 ITU-T G.692 建议的特定波长的光信号，然后再把各个特定光波长经合波器（M16）复用成多波长的光信号放大，并附上波长为 λ_s 的光监控信道，送入光纤传输，其逆过程是 OTM 从光纤中先把光监控信道 λ_s 取出，然后对多波复用的主信道进行光放大，经分波器（D16）解复用成 16 个波长的各终端信号，再经接收端波长转换器（RWC），还原成原光信号送至各终端设备（如 SDH 的 TM）。OTM 的功能示意如图 6-15 所示。

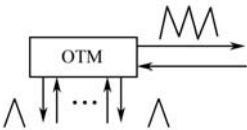


图 6-15 OTM 功能示意图

下面进一步介绍组成 OTM 的各部分功能原理，OTM 的机框如图 6-16 所示，其作用如表 6.2 所示。

表 6.2 OTM 组成及各部分作用

OTM 机框组成	作 用
TWC	发端波长转换器（OUT）把 G957 信号变为 G692
RWC	收端波长转换器（OUT）把 G692 信号还原为 G957
SCC	主控板（人机对话的桥梁）
SC1/SC2	单向/双向光监控板
M16	16 合波器
D16	16 分波器
WBA/ WPA	光功率/光前置放大器
SCA（OSC）	光监控通道接入和合波/分波板
OHP	公务电话板

1. TWC组成及功能

TWC 采用的是 O/E/O 的方式。其原理框图如图 6-17 所示。TWC 的光输入端口接收来自 SDH 设备符合 ITU-T G.957 建议的 STM-N 光信号，输出光波长完全符合 ITU-T G.692 建议的光信号，标称中心频率为 192.1~195.2 THz，中心频率偏移≤10 GHz（寿命期内）。发送光信号的最小消光比 EXT≥10 dB。



图 6-16 OTM 终端机框

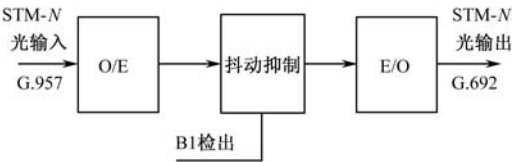


图 6-17 TWC 的原理框图

TWC 板还具有再生中继功能，可完全达到 ITU-T 规定的输入抖动容限和抖动转移特性等性能指标；TWC 提供再生段 B1 字节的监测（B1 误码上报），可以通过对 B1 字节的监测，定位线路的故障所在；光接收机 O/E 模块在比特误码率 BER=10⁻¹² 条件下，最小接收灵敏度为-25 dBm（APD 接收模块）或-18 dBm（PIN 接收模块），光接收机过载光功率为-9 dBm（APD 接收模块）或 0 dBm（PIN 接收模块）；提供以下监测功能：激光器偏流监测、激光器制冷电流监测、发送光功率监测和接收光功率监测等。特别是接收光功率的监测，使得定位故障更加方便；具有激光器自动关断（ALS）功能，当接收无光时，自动关断光发送模块 E/O 模块。

2. RWC组成及功能

RWC 板是 TWC 板的逆过程，在此不多讲述。

3. M16 板组成及功能

M16 板完成 16 通道光复用，也称作合波板，其原理框图如图 6-18 所示。按照功能模块划分，它主要由光路模块和电路模块构成。光路模块包括一个 16 通道合波器和两个 10:90 光耦合器，完成 16 个波长通道的复用，90%进入主信道，10%中的 90%提供在线光监测口 MON。可以由该光口接入光谱分析仪或多通道处理板 MS2，在不中断业务的情况下，监测主信道的光谱，而 10%中的 10%进行输出光功率检测，通过 PIN 的 O/E 变换，再通过邮箱保持与主控板 SCC 及网管系统的通信，上报单板告警及性能事件。M16 板上使用的合波器为多层介质膜滤波器型或耦合器型。

M16 板 16 个通道对应的波长和频率见表 6.1，表中序号为 01~16。

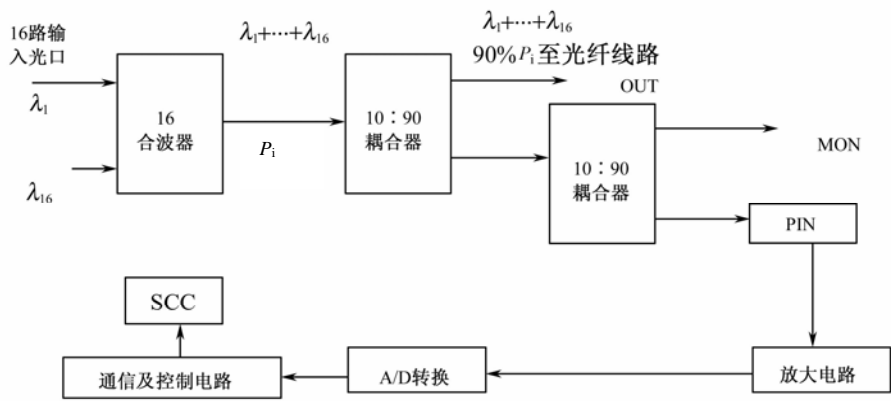


图 6-18 M16 板的原理框图

4. D16 板组成及功能

D16 板完成 16 通道分波，是 M16 的逆过程，其原理框图如图 6-19 所示。按照功能模块划分，它主要由光路模块和电路模块构成。光路模块包括一个 16 通道分波器和两个 10:90 光耦合器，完成 16 个波长通道的解复用并提供在线光监测口 MON，分波器为多层介质膜滤波器型。其他输出口作用与 M16 板相同。

D16 板 16 个通道对应的波长和频率见表 6.1，表中序号为 01~16。

5. SCA板组成及功能

SCA 板核心部分是一个光波分复用的合波器和一个分波器，其原理如图 6-20 所示。它的功能是将主信道和光监控通道合并或分开。单独设计 SCA 板的原因是由于 SCA 板的作用，它使主信道和光监控通道相互独立，互不影响。当系统发生局部故障时，若是光监控通道出现问题，可以直接更换光监控通道处理板 SC1 或 SC2，而不会影响主信道的业务。

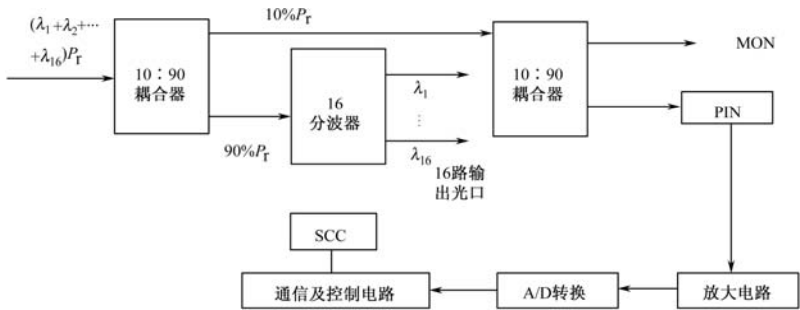


图 6-19 D16 板的原理框图

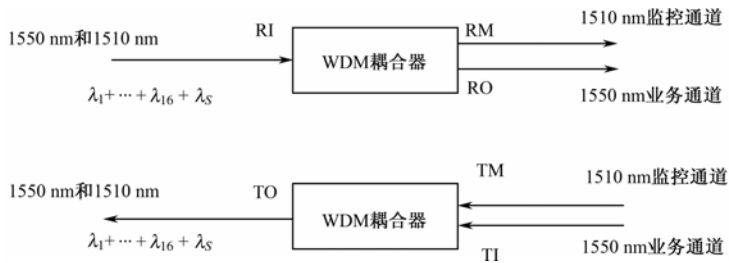


图 6-20 SCA 板的原理框图

6. SC1 板组成及功能

SC1 板用于实现 λ_s 光监控通道信号的处理，完成终端站光监控通道光信号的收、发处理，SC1 板原理框图如图 6-21 所示。

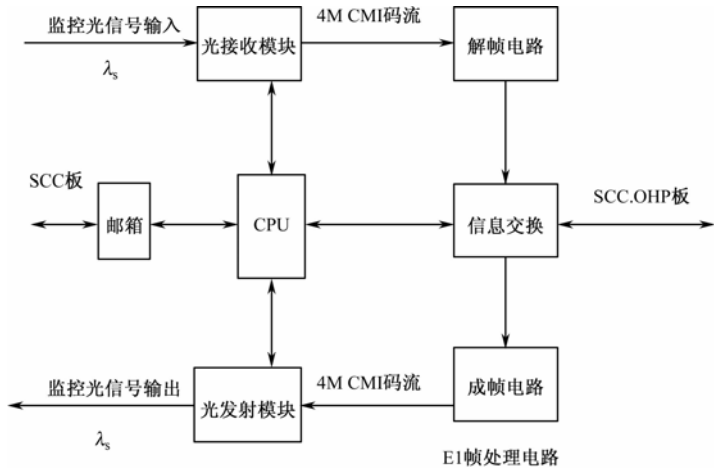


图 6-21 SC1 板的原理框图

光接收模块完成光/电转换，以便监控板进行处理，并在无光时给出告警信号，通过 CPU 上报 SCC 板。

解帧电路首先将光接收模块送来的电信号进行 CMI 解码，再从解码数字流中搜索复帧结构的 E1 帧，提取 E1 帧中的 E1,E2,F1,D1~D12 等字节，提供给 SCC 板和开销处理板 OHP

处理，同时完成 E1 信号处理功能，包括误码计数、远端告警和帧失步告警等，CPU 收集这些信息上报给 SCC 板。

监控通道帧结构所采用的典型 E1（2M）帧时隙分配图，如表 6.3 所示。

表 6.3 典型 E1 帧结构的时隙安排

0	1	2	3	...	14	15	16	...	31
---	---	---	---	-----	----	----	----	-----	----

E1 帧时隙安排：0 时隙为帧定位字节，1 时隙为 E1 字节（中继段公务），2 时隙为 F1 字节，3～14 时隙为 D1～D12 字节（数据通信通道），15 时隙为 E2 字节（复用段公务），16～31 时隙备用保留字节。

信息交换是完成 SC1 板与 SCC、OHP 板的数据交换。SC1 板可提供 D1～D12 共 768 kb/s 的数据通道，以串行方式与 SCC 板连接，并提供当 SCC 板不在位时，DCC 穿通保护功能以及 OHP 板不在位时的 E1、F1、E2 字节的穿通保护功能。

成帧电路是将信息交换后的监控信息变成 E1 数据流，再经 CMI 编码发往光发模块进行传输。

激光发射模块将 CMI 码流转换为光信号通过光口输出，同时接受 CPU 的控制，以便在需要时关断激光器。

CPU 收集 SC1 单板的一些状态、告警信息，通过邮箱与 SCC、OHP 通信，并完成 A/D 转换、环境温度检测、控制端口（如激光器关断、运行灯闪烁、告警灯闪烁等）以及 Watchdog 防程序死循环等功能。

SC2 板可以实现对两路光监控通道的信号处理，适应光中继站对两个方向光监控信号的收、发处理的需要。SC2 板硬件原理、功能、应用及告警等与 SC1 板基本相同，只是在光口处理上增加了一路，这里不再赘述。

7. SCC（System Control & Communication）板组成及功能

SCC 承担的是对设备的管理及相互之间通信的功能，可以说 SCC 板是整个 DWDM 系统的控制中心，如图 6-22 所示。

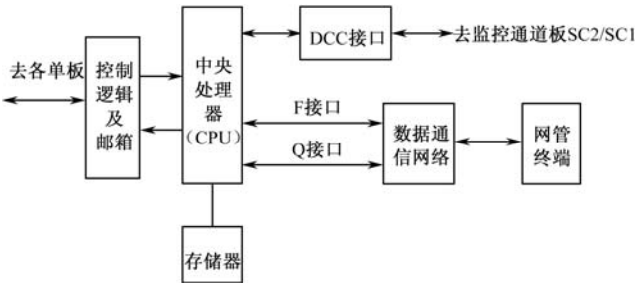


图 6-22 SCC 板的原理框图

8. 光功率/前置放大/光线路放大板（WBA/WPA/WLA）

WPA 板一般安装在 OTM 的接收端，通常简称为前放（预放），用来提高光接收机的接

收灵敏度, 补偿光无源器件的插入损耗。WPA 功能可同时放大 32 个通道(通道间隔为 0.8 nm)的光信号, 工作波长范围为 1535~1561 nm; 在工作波长范围内增益平坦, 平坦度<2dB, WPA 板功能框图如图 6-23 所示。WPA 各型号参数如表 6.4 所示。

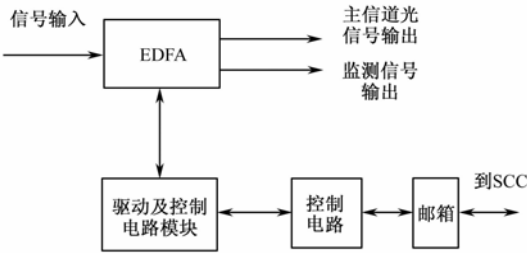


图 6-23 WBA/WPA/WLA 板功能框图

表 6.4 WBA/WLA/WPA 的各型号参数

单板名称	最小输入光功率/(dBm)	最大输入光功率/(dBm)	增益/(dB)
16 通道系统 WBA01	-20	-6	23
16 通道系统 WLA05	-30	-16	33
16 通道系统 WPA01	-28	-13	23

6.2.2 光线路放大设备 (OLA)

OLA 主要完成对多个光载波进行放大功能, 通常用 EDFA 作为 OLA, 其功能如图 6-24 所示。

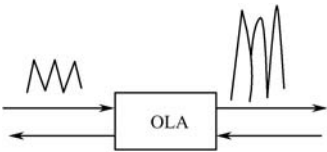


图 6-24 光纤放大器的基本功能示意图

OLA 组成和机框图, 如图 6-25 所示, 其作用如表 6.5 所示。OLA 中与 OTM 组成中相同的单板功能, 在此不详细叙述。

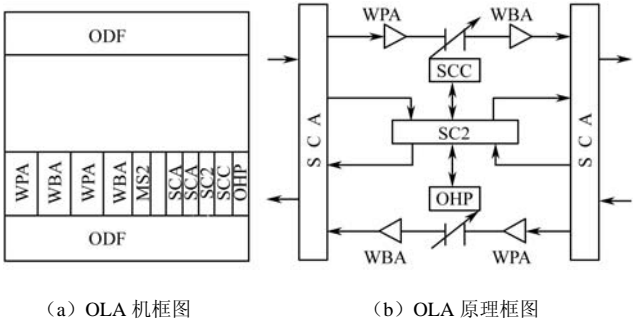


图 6-25 光线路放大器框图

表 6.5 OLA 组成单元及作用

OLA 组成	作 用
SCC	主控板（人机对话的桥梁）
SC1/SC2	单向/双向光监控板
WBA/ WPA	光功率/光前置放大器
SCA（OSC）	光监控信道合波/分波
MS1/MS2	单向/双向多信道处理板（选用）
OPC	光保护板（选用）

6.2.3 光分插复用设备（OADM）

在 DWDM 环状网络中 OADM 是不可缺少的基本网元，其功能如图 6-26 所示。

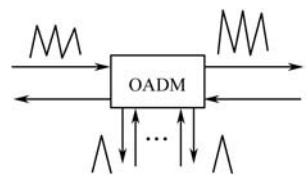


图 6-26 OADM 功能示意图

OADM 是将光复用、解复用、直通、发/收端波长转换器（TWC/RWC）、光预放大器、光前置放大器等功能综合于一体，具有灵活的上、下波长功能，在网络设计上有很大灵活性。可将 SDH 设备输出的光信号 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$ ，分别利用 TWC 把非特定波长的光信号转换成特定波长的光信号，然后再把各个特定光波长信号复用成多波长的光信号，送入东向或西向或东西向光纤传输，其逆过程正好

相反。OADM 设备可以替代 OTM 作为光终端复用器，可在系统中间站方便地将光支路信号从主信号码流中提取出来，也可将光支路信号方便地插入到主信号码流中。还可以将西向线路的光信号通到东向线路上。从而方便地实现网络中信号码流的分配、交叉与组合。在实际应用中，有多种类型的设备。

下面以图 6-27 的 OADM 组成为例，其作用见表 6.6。

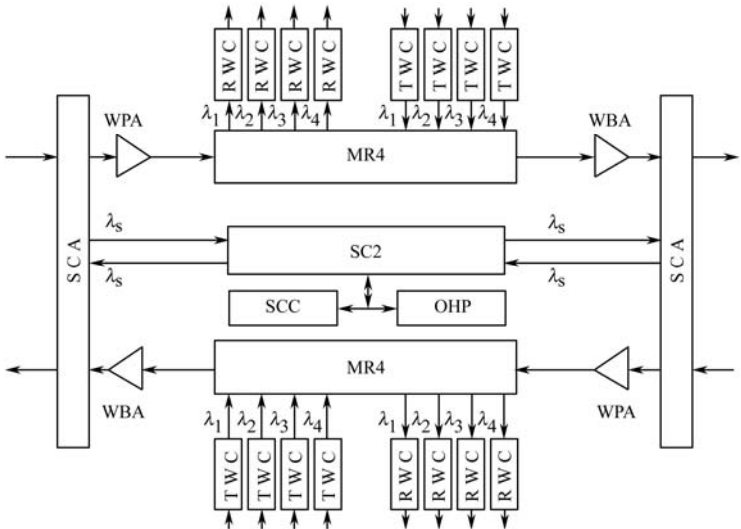


图 6-27 OADM 设备的组成

表 6.6 OADM 组成单元及作用

OADM 组成	作 用
TWC/ RWC	发端和收端波长转换器（OUT）
SCC	主控板（人机对话的桥梁）
SC2	双向光监控板
MR4	复用、解复用、直通（OXC）
WBA/ WPA	光功率放大器/光前置放大器
SCA（OSC）	光监控信道合波/分波板
OHP	公务电话

从 OADM 组成来看，除了 MR4 单板外，其他单板功能与相应的 OTM 组成相同，这里只介绍 MR4 作用。

MR4 的作用是完成复用、解复用、直通和波长路由选择动态重构的交叉连接。

6.2.4 光交叉连接设备（OXC）

OXC 是 DWDM 网络中的一个重要网元设备，其 OXC 与 DXC 在网络中的作用相同，但功能和实现方法有所不同，OXC 是对光信号交叉连接，并可以对不同传输代码格式和不同速率等级（如 PDH、SDH 和 ATM 等各种速率和格式）的信号进行交叉连接，实现光波分复用网的自动配置、保护/恢复和重构。

光交叉连接器通常分为 3 类，即光纤交叉连接器、波长交叉连接器和波长选择交叉连接器，这里着重对其结构和工作原理进行介绍。

光纤交叉连接器连接的是多路输入输出光纤，如图 6-28 所示，每根光纤上所有波长光信号的总容量为基本单位进行交叉连接，这种交叉连接器，只有空分交换开关，交换的基本单位是一根光纤，而不是一个波长，不能实现波长选路。

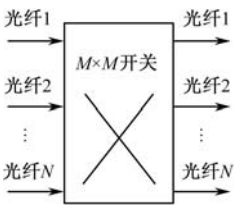


图 6-28 光纤交叉连接器

波长交叉连接器的典型结构如图 6-29 所示，多路光纤中的各波长光信号分别接入各自的解复用器（DMUX），解复用后的相同波长的信号进行空分交换，交换后的各路相同波长的光信号分别进入各自输出口的复用器（MUX），最后复用后从各输出光纤输出。在这种结构中由于不同光纤中的相同波长之间可以进行交换，因而可以较灵活地对波长进行交叉连接。

波长选择交叉连接器可将入口处任何光纤上的任何一种波长交叉连接到任何一条出口光纤上，如图 6-30 所示。它既可以完成空间交换又可以进行波长变换，可将入口光纤中的所有波长一一对应地交换到出口光纤中的不同波长上。这种方式可以实现波长之间的任意

交叉连接，具有最高的灵活性。

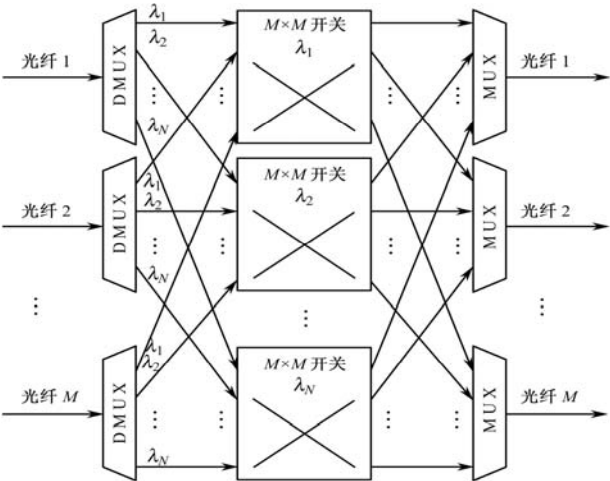


图 6-29 波长交叉连接器

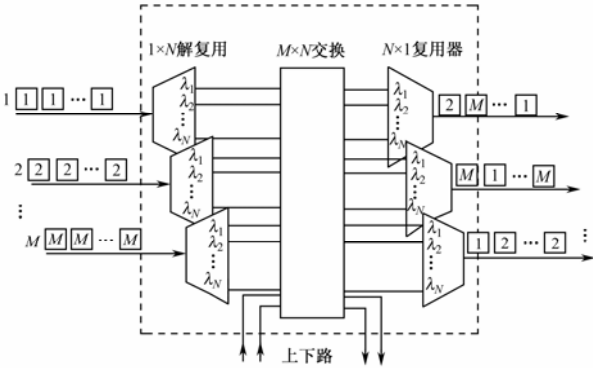


图 6-30 波长选择交叉连接器 (WSXC)

6.3 DWDM网络结构与保护

DWDM 技术极大地提高了光纤的传输容量，随之带来了对电交换节点的压力和变革的动力。为了提高交换节点的吞吐量，需要在交换方面引入光子技术，从而引起了 WDM 全光通信的研究。WDM 全光通信网是在现有的传输网上加入光层，在光上进行 OADM 和 OXC，目的是减轻电节点的压力。

6.3.1 光传送网的分层

ITU-T 的 G.872（草案）已经对光传输网的分层结构提出了建议。建议的（从垂直角度）分层方案是将光传输网分成光信道层（OCh）、光复用段层（OMS）和光传输段层（OTS）。与 SDH 光传输网相对应，光层加到 SDH 传输网分层结构的段层和物理层之间，如图 6-31

所示。因此有关电路层、电通道层、段层功能与 SDH 光传输网中电路层、通道层、段层相同，不多述。下面重点介绍光层功能。根据 G.709 的建议，OCh 层又可以进一步分为光信道的净荷单元（OPU）、数据单元（ODU）和传输单元（OTU）。这种子层的划分方案既是多协议业务适配到光网络传输的需要，也是网络管理和维护的需要。

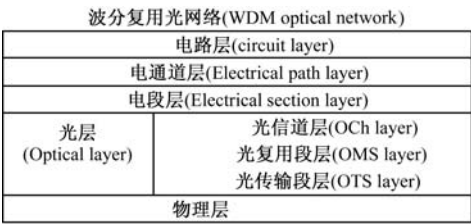


图 6-31 WDM 光传送网的分层结构

- 1) 光信道层（OCh）
- OCh 为不同格式（如 PDH565 Mb/s, SDH STM-N, ATM 信元等）的用户信息提供端到端透明传输的光信道网络功能，其中包括：为灵活的网络选路重新安排信道连接；为保证光信道适配信息的完整性处理光信道开销；为网络层的运行和管理提供光信道监控功能。
- 2) 光复用段层（OMS）
- OMS 为相邻两个波分复用传输设备间多波长信号完整传输提供网络功能，它包括：为灵活的多波长网络选路重新安排光复用段连接；为保证多波长光复用段适配信息的完整处理光复用段开销；为段层的运行和管理提供光复用段监控功能。
- 3) 光传输段层（OTS）
- OTS 为光复用段信号在不同类型的光媒质（如 G.652, G.653, G.655 光纤）上提供传输功能，包括对光放大器的监控功能。

图 6-32 是 WDM 光传送网从水平角度分层的一个示例，用于表示光传送网提供端到端的连接。由图中可以看出整个光传送网的分层结构，OCh 层、OMs 层、OTS 层形成客户 / 服务者关系，服务层是为客户服务的，它是客户层网络的基础。OMs 段层是由多个 OTS 段层组成，OCh 段层又是由多个 OMS 层组成。如果某一个 OTS 段层出现故障，必将影响相应的 OMS 段层和 OCh 段层。

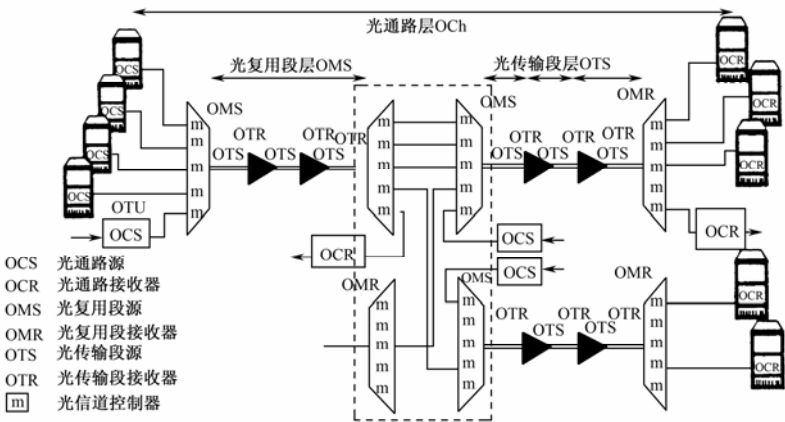


图 6-32 WDM 光传送网的分层结构（用于端到端的连接）

根据 ITU-T 的 G805 建议，光传输网的每层网络可以进一步分割成子网和子网间链路，以反映该层网络的内部结构。对传输网进行分层和分割，可以使复杂的网络变得简单，便于进行管理、规划和设计。当发生故障时，可以把故障的影响范围限制在最小的范围内，同时也便于故障的及时修复。

6.3.2 DWDM网络结构

由于 WDM 系统的应用以及 OADM, OTM, OXC 和光交换设备的出现，使各系统连接成全光网。其连接方式与一般网络拓扑类型类似，可分为线状、星状、环状、树状、网孔状等。其中点到点组网是目前 DWDM 设备组网最普遍的一种方式，它可选择是否需要 OADM 设备，但 OTM 设备和 OLA 设备是必需的。DWDM 的基本组网方式有点到点链状方式、星状组网方式、环状组网方式，由这 3 种方式可组合出其他较复杂的网络形式。

1. 链状组网

链状结构网络如图 6-33 所示，它由 OTM, OADM, STM-16 光支路信号设备组成。

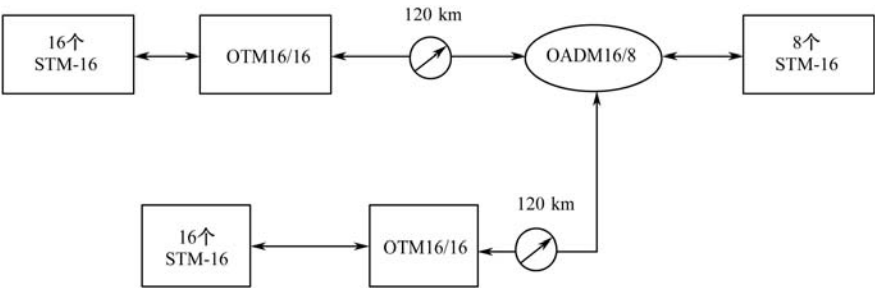


图 6-33 链状 DWDM 网络组成

2. 环状组网

环状结构网络如图 6-34 所示。

3. DWDM网络设计中考虑的重要问题

DWDM 网络设计中最重要的问题是信道串扰，所谓串扰是指一个信道的能量转移到另一个信道，因而当信道之间存在串扰时，会引起接收信号误码率升高，灵敏度下降，因而对串扰产生机理的研究更显其重要性。

产生串扰的原因主要有两类，一类是选择信道的解复用元件的非理想特性导致的线性串扰，另一类是由光纤线路的非线性性质引起的非线性串扰。当 DWDM 网络在分配多信道信号或用户要选择自己所需的信号时，通常用两种方法实现信道选择，一种在光域进行选择，另一种在电域进行选择。电域选择适用于相干检测技术，光域选择适用于直接检测和相干检测。光域选择要求在光接收机前接入一个光滤波器。

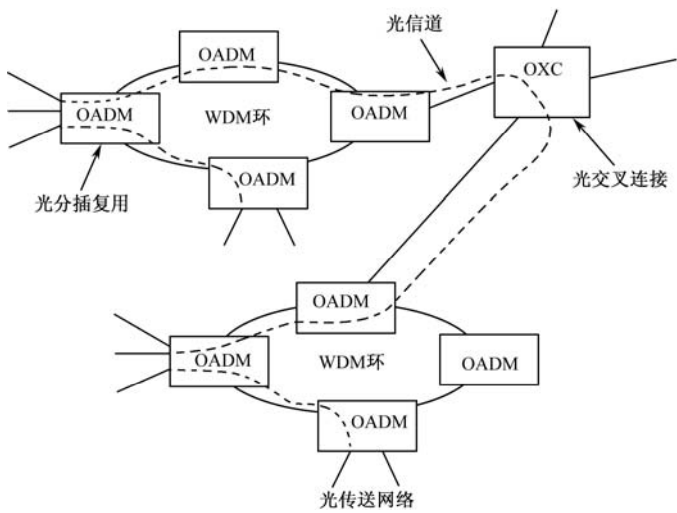


图 6-34 环状 DWDM 网络

1) 线性串扰

线性串扰通常发生在解复用过程中，它与信道间隔、解复用方式以及器件的性能有关。在 IM-DD 的多路复用光通信系统中，常采用光滤波器作为解复用器，因而串扰的大小取决于用于选择信道的光滤波器的特性。

2) 非线性串扰

当光纤处于非线性工作状态时，光纤中的几种非线性效应均可能在信道间构成串扰，具体来讲，就是一个信道的光强和相位将受到其他相邻信道的影响，从而形成串扰。由于是光纤非线性效应引起的，故这种串扰便称之为非线性串扰。光纤的非线性效应包括受激拉曼散射、受激布里渊散射、交叉相位调制和四波混频等。

6.3.3 DWDM自愈环网原理

DWDM 光网保护与恢复的方法较多，主要表现在光线路故障的保护与恢复和光通道（光电器件）故障的保护与恢复，具体分析 with SDH 网络类似。此网络保持了较高的生存性，其自身具有自愈功能。它们可分为单纤环、二纤环和四纤环等。以下主要介绍线路 1+1 光复用段保护、二纤单向通道保护环和二纤双向共享环。

1. 光复用段保护

这种技术是只在光路上进行 1+1 保护，而不对终端设备进行保护。在发送端和接收端分别使用 1×2 光分路器和光开关，在发送端，对合路的光信号进行 1:1 分离，实现 WDM 线路 1、线路 2 传输相同信号。在接收端，对光信号进行选路。图 6-35 采用光复用段保护方案。这种系统的特点是，只有光缆和 WDM 的线路系统有备份，而其他如 SDH 终端和复用器则是没有备用的。正常情况下接收端的多波光信号在 WDM 线路 1（工作系统）与光开关连通。而保护系统与光开关处于断开状态。当 WDM 线路 1 光缆断裂，同时发出高电平使接收端的光开关自动闭合 WDM 线路 2（保护系统），从而达到保护作用。

光复用段保护只有在独立的两条光缆路由中实施才有真正的实际意义。

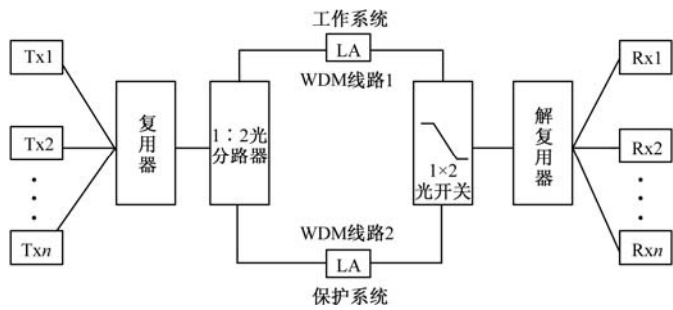


图 6-35 光复用段（OMSP）保护

2. 二纤单向通道保护环

二纤单向环是当前研究最多，也是比较成熟的一种环状网物理结构，它采用 1+1 保护方式。二纤单向通道保护环结构，如图 6-36 所示。其外环光纤为工作光纤，正常工作时携带复用的多波长工作业务，内环光纤为备用保护光纤。若环网中 A,B 互通业务，网元 A 和 B 都将上环的业务“并发”到外环和内环，所传业务相同且流向相反。在网络正常时，信息由网元 A 插入，经 D,C 网元到达 B 网元，另一路由备用光纤携带，直接到达 B 网元，在网元 B 自动“选收”工作光纤上的 A 到 B 的业务，完成网元 A 到网元 B 的业务传输。同样当信息由网元 B 插入后，分别由工作光纤和保护光纤所携带，前者直接到网元 A，后者经网元 C,D，到达网元 A，在网元 A 仍然“选收”工作光纤上的 B 到 A 的业务，完成网元 A 到网元 B 的业务传输。

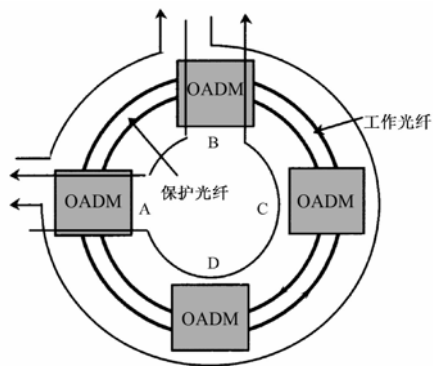


图 6-36 二纤单向通道保护环

当 A,B 方向上光纤出现故障，如被切断，A 到 B 业务实际传输的路由不变，而 B 到 A 业务相当于被切换到反向传输的内环光纤上，即从 B 插入，经 C,D 网元到达 A 网元。这里由接收端从内环光纤中选择光信号实现业务的恢复。此种保护方式使用“源端并发，宿端选优”的配置方式，不需要协议就可以完成通道恢复。

3. 二纤双向共享环

二纤双向共享环类似于 SDH 的复用段保护环。它是将每一根光纤上的波长信道一分为二（平分）如 $\lambda_1 \sim \lambda_{N/2}$ 和 $\lambda_{N/2+1} \sim \lambda_N$ ，如图 6-37（a）所示，光纤 1 上把前半段波长组 $\lambda_1 \sim \lambda_{N/2}$ 分为工作信道，后半段波长组 $\lambda_{N/2+1} \sim \lambda_N$ 分为光纤 2 的保护信道（或光纤 1 的额外信息信道）。同样光纤 2 上也把前半段波长组的 $\lambda_1 \sim \lambda_{N/2}$ 作为工作信道，后半段波长组 $\lambda_{N/2+1} \sim \lambda_N$ 也作为光纤 1 的保护信道（或光纤 2 的额外信息信道）。在图 6-37（b）中，网元 A 与 B 之间的光纤切断后，光纤 1 上的工作信道倒换到光纤 2 上的保护信道，这里需要进行波长转换。

下面还是以节点 A，节点 C 间的信息传递为例（如图 6-37 所示）说明其自愈环的工作原理。正常工作情况下，如图 6-37（a）所示，当信息由 A 插入时，首先是由光纤 1 前半段波长组 $\lambda_1 \sim \lambda_{N/2}$ 携带信息，经 B 节点到 C 节点下业务，完成由 A 到 C 的信息传输。而当信息由 C 节点插入时，则也是由光纤 2 前半段 $\lambda_1 \sim \lambda_{N/2}$ 携带对应信息，经 B 节点到达 A 节点下业务，从而完成 C 到 A 节点信息传递。

当 A 节点，B 节点间出现断纤故障时，如图 6-37（b）所示，由于断纤故障点相连的网元 A，B 都具有环回功能，这样当信息由网元 A 插入时，首先由光纤 1 前半段 $\lambda_1 \sim \lambda_{N/2}$ 携带，经网元 A 波长转换器将前半段所携带信息转换到光纤 2 的后半段 $\lambda_{N/2+1} \sim \lambda_N$ 保护信道中，此时光纤 2 的后半段额外信息被中断，然后经过 D 节点到达 B 节点，再通过波长转换器又将光纤 2 的后半段波长组 $\lambda_{N/2+1} \sim \lambda_N$ 携带信息置于光纤 1 前半段 $\lambda_1 \sim \lambda_{N/2}$ 工作信道中，最后到达 C，从而完成了 A 到 C 节点的信息传递。而由 C 插入的信息则先由光纤 2 的前半段 $\lambda_1 \sim \lambda_{N/2}$ 携带，经 B 节点的波长转换器转换到光纤 1 的后半段 $\lambda_{N/2+1} \sim \lambda_N$ 保护信道中，沿线经 C 节点，D 节点到达 A 节点，又由 A 节点再通过波长转换器转入到光纤 2 的前半段 $\lambda_1 \sim \lambda_{N/2}$ 工作信道中，最后从 A 节点下业务，以此完成由 C 节点到节点 A 的信息传递。

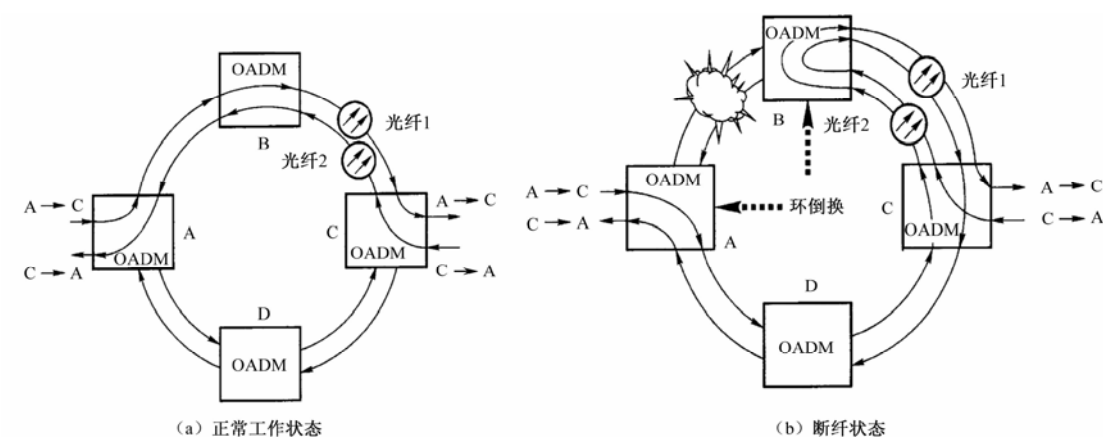


图 6-37 二纤双向共享环

这里需要说明的是，在工作情况下，光纤 1、2 的后半段 $\lambda_{N/2+1} \sim \lambda_N$ 信道可作为传输额外信息，当线路出现故障时，光纤 1、2 后半段 $\lambda_{N/2+1} \sim \lambda_N$ 信道已作为保护信道，此时原来的额外信息被冲掉，从而实现自愈保护功能。

6.3.4 DWDM网络管理

1. 网络管理的特点

DWDM 网的网络管理与 SDH 相比有其自己的特点和特殊要求。

（1）在 DWDM 光网中，用户信息的传输、复用、选路、监视等处理功能都要在光域内进行，因此光网络的管理方式应该适应光层管理的特点。

（2）在 DWDM 光网中，节点设备由于有 OXC 和 OADM，因此应引入对这些设备的管理实体。

（3）由于 DWDM 光网的协议透明性，在单一的物理构架中可同时存在多种形式的协议流，光网络中的协议无法预知，因此光网络需要自己的网络管理信息结构和开销方案。

（4）由于 DWDM 光网络要实用，要支持各种传输业务，那么对 WDM 光网络管理要考虑与现已建立的 SDH/ATM 传输网的兼容、配合问题。

根据以上要求，参照电信管理网 TMN 系统结构来设计 DWDM 光网的管理系统，其系统结构如图 6-38 所示。此系统采用数据网来传输网管信息，它与光的传输网本身分开，通过 ITU-T 协议的数据通信网（DCN），如 G.773 中 X.25 协议等来进行连接。此网管系统不仅提供了光网络与光设备等网管功能，而且还能实现网络的操作系统与网元之间的通信功能。在操作系统和网络单元之间通过 Q₃ 接口进行连接。

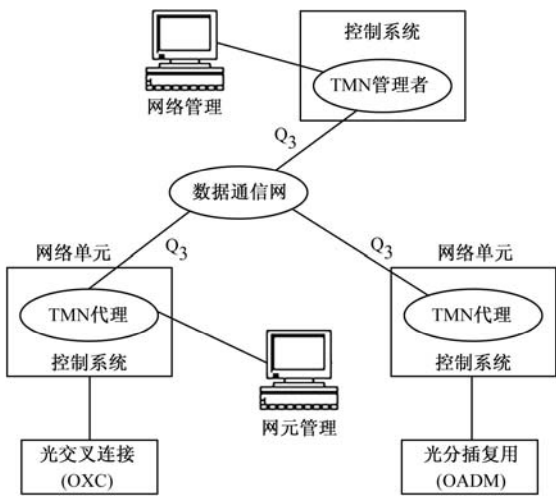


图 6-38 DWDM 光网管理系统结构

DWDM 光网的管理信息主要有信号失效的故障信息，路经终端失配和连续性丢失等缺陷信息，还有光波长、光强、信噪比、光复用段 AIS（Alarm Indication Signal），RDI（Remote Defect Indication）以及保护控制信号的性能质量信息等。

2. 管理信息传输方案

目前已经提出多种实现光网络管理信息的传输方案。考虑到全光网长远的发展趋势，

最好是能够由光传输网自身实现传输信令的功能。具体的全光网开销信道的实现方案包括带内和带外两种形式,带内开销信道可以利用附加在线路信号上的一个低频调制(EDFA 的泵浦调制)来实现,因而不需要额外的光信道。研究表明,甚至在没有线路信号的地方,EDFA 的 ASE 也可以用来传输开销信息。但是,带内信号的存在限制了线路信号的可用带宽和信噪比。

利用额外的光频率可以很容易地实现带外方式的开销通信。此时,可以采用某一数据波长(工作于 1510 nm 或其他波带的波长 1300 nm)传递开销信息,即用一个单独的光监控信道(OSC)通道作为管理信道。高速的数据信道和管理信道在传输过程中进行复用,只在网络节点处通过解复用器分离。在 EDFA 的增益带边缘设置一个专门用于光传输段通信的信道,同时在 EDFA 增益带内设置一个用于光复用段和光通道层通信的信道,是一种值得推荐的做法。

1) 光监控通道(OSC)

在光传输网中,OSC 就是在光传输段层的传输实体间传递开销信息的光载波。光监控信道终结于光传输段层,但它可携带多种开销信息并且某些开销可被其他层网络使用。光传输段层和光复用段层的所有开销信息都可放到光监控信道中。其优点是可以减少用于网络监视所牺牲的光带宽,同时也避免了在 DWDM 系统中占用净负荷的光带宽。

对于 OSC,建议采用的载波波长是 1510 ± 10 nm。OSC 的传输速率暂时采用 2.048 Mb/s,OSC 由帧定位信号(FAS)和净负荷组成,如表 6.3 所示。光监控信道的净负荷可分为两类信息:维护信号和管理消息。维护信号是在网元之间进行交换的,在网络中采用面向比特的协议来传递。网络层的管理开销基本上都可以放到维护信号段传输。可以将维护信号按网络分层结构进行划分。

管理消息实现了数据通信通道,用在网元与操作系统之间传递管理数据,采用的是面向消息的协议。网元管理信息都是通过管理消息的数据通信通道传输的,采用 DCC 字节。

2) 导频-副载波调制

可以对光信道(OCh)采用副载波调制(SCM)技术,如 AM(幅度调制)、PM(相位调制)、偏振调制方法来对激光器进行调制,实现带内监视。这种方法的优点是实现了带内监控信号而没有牺牲一个可用波长,但这种方法也有很大的局限性。

3) OSC 通路数据通道保护

当某光纤段中 OSC 通路双向都断路时(如光纤段的两根光纤都断开时),网元管理系统将无法获取网元的监控信息,为防止这种情况带来的严重后果,WDM 系统应该具有监控通路的保护功能。例如,在 WDM 系统的两个终端站可提供 OSC 中 DCC 通道的保护路由(如 IP, X.25),如图 6-39 所示。

4) 管理通道的两种传输方法

管理通道有两种传输方法,即中继和透明传输方法。所谓中继传输方法是指管理通道信息在中继段的线路光放大器上终结,然后再向下传输;而透明传输方法是管理通道信息在中继段的线路光放大器上不终结,直接向下传输,直至下一个节点终结。两种方法的图示如图 6-40 所示。图中实线对应透明传输方式,虚线代表中继传输方式。

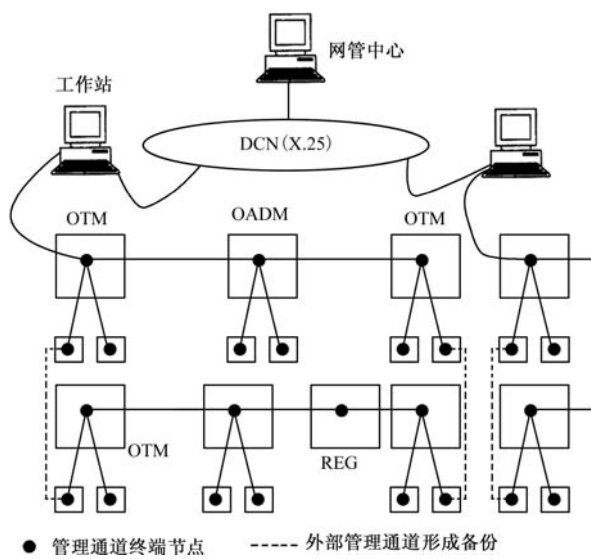


图 6-39 灵活的管理通道

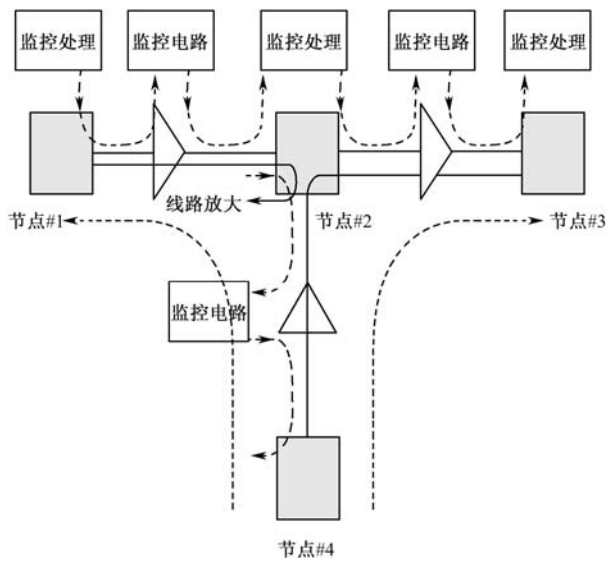


图 6-40 管理通道的两种传输方法

6.4 DWDM光网络在长途干线的应用

DWDM 光网络在长途干线应用实例一为贵州省干线 DWDM 传输网实验局，如图 6-41 所示。

实例二为黑龙江 DWDM 传输干线，如图 6-42 所示。

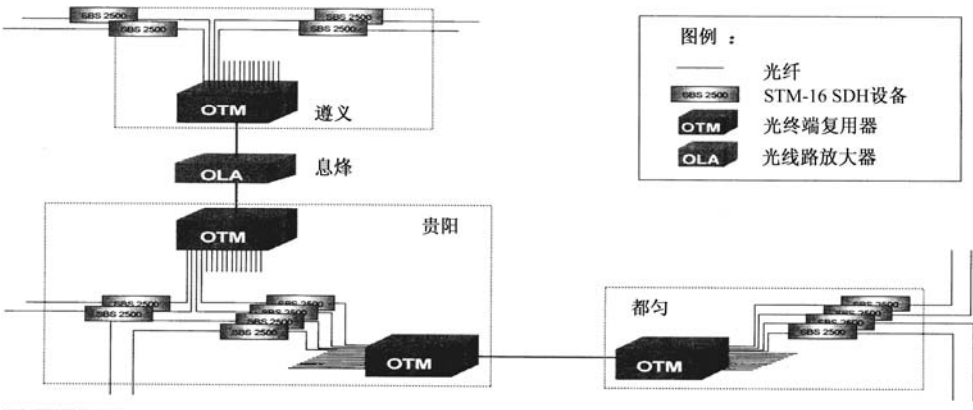


图 6-41 贵州省干线 DWDM 传输网实验局示意图

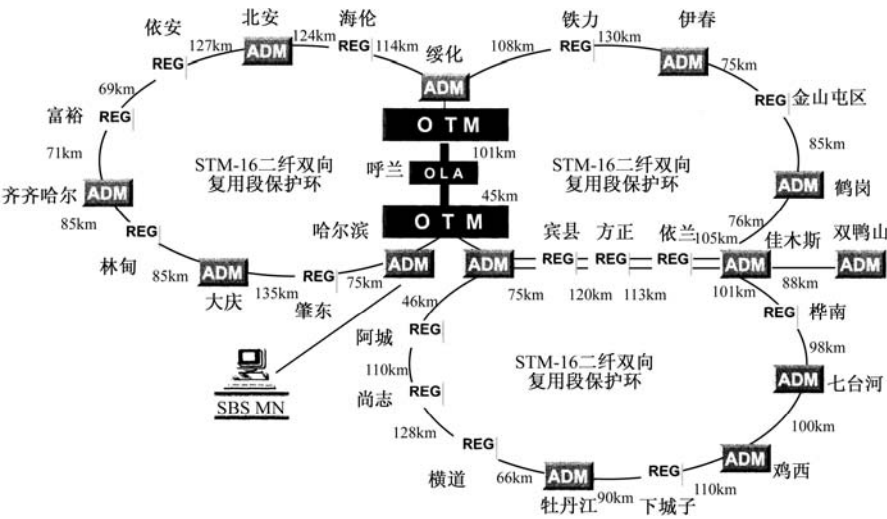


图 6-42 黑龙江 DWDM 传输干线示意图

习 题

1. 比较波分复用 (WDM) 和密集波分复用 (DWDM) 在定义上的差别。
2. 用 6 个 DWDM 器件设计出 4 端口的波长路由器, 要求画出设计结构光路图, 将波长分配标注在图上。
3. 简述实现 DWDM 系统的关键技术。
4. 画出实用 DWDM 系统基本结构图, 并解释每一部分的功能。
5. 现有 32 波的 DWDM 的二纤双向共享自愈环, 如图 6-43 所示。若 B 与 C 之间断纤, 指出 A 与 C 的业务流向。

6. 将 DWDM 的网络基本单元，填入图 6-44 所示的网络 A, B, C, D, E, F, G, H, I, J 结构中。

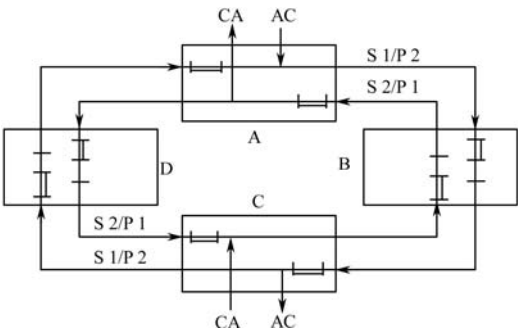


图 6-43

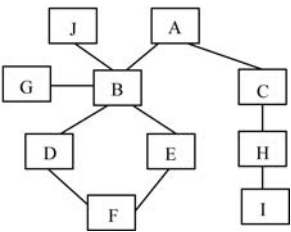


图 6-44

第 7 章 光纤接入网

7.1 光纤接入网的基本概念

接入网（Access Network, AN）是宽带核心网络到用户网最后一段路程的传输网络。近年来核心网络的带宽高速拓展，已经远远超过了接入网的承载能力，使得核心网的带宽和过去的接入网的带宽严重不匹配，接入网已成为宽带业务进入用户的最后瓶颈。以此同时，光纤接入网的迅猛发展，使解决这一瓶颈问题有了技术依靠，先后出现了模拟的光纤/同轴混合接入网（Hybrid Fiber Coaxial, HFC），数字的无源光网络（Passive Optical Network, PON），其中包括 APON（ATM-PON），EPON（Ethernet-PON）和 GPON（Gigabit -PON）以及有源光网络（AON, Active Optical Network）等。

7.1.1 接入网的界定与分层

1. 接入网的界定及参考模型

一个国家信息基础构造由骨干网（长途干线网）、城域网（本地网）和接入网三大部分组成。接入网是核心网与用户之间的连接系统，在电信网中占有重要地位。虽然接入网早已存在，但接入网一词的出现是近年的事。ITU-T 关于接入网的框架建议 G.902 对接入网定义为：接入网由用户网络接口（User-to-Network Interface, UNI）和业务节点接口（SNI）之间的一系列传输实体（如线路设施和传输设备）组成，为传输电信业务而提供所需传输承载能力的实施系统，如图 7-1 所示。AN 可通过网管接口 Q3 来管理，原则上，与接入网相连的 UNI 和 SNI 的种类和数目不受限制，接入网不解释用户信令，是透明传输的。

具体来说，接入网通过 UNI 向用户终端提供业务，通过 SNI 连接到业务节点（Service Node, SN），由 SN 提供业务实体，例如本地交换机、租用线业务节点或特定配置下的视频点播业务节点等，并通过 Q3 接口连接到电信管理网（Telecommunication Management Network, TMN）。

接入网的参考模型如图 7-2 所示，其中灵活点和分配点是非常重要的两个信号分路点，大致对应于传统铜线用户接入网的交接箱和分线箱。根据图 7-2 所示的结构，所谓接入网一般是指市话交换局或远端交换单元（RSU）至用户终端之间的部分，通常不含有市话交换局和 RSU 之间的部分，图中的远端交换单元和远程终端设备（RT）可根据实际需要来决定是否设置。然而有时从维护的角度将端局至用户之间的部分统称为接入网，不再计较是否包含 RSU，但注意这不是技术定义。

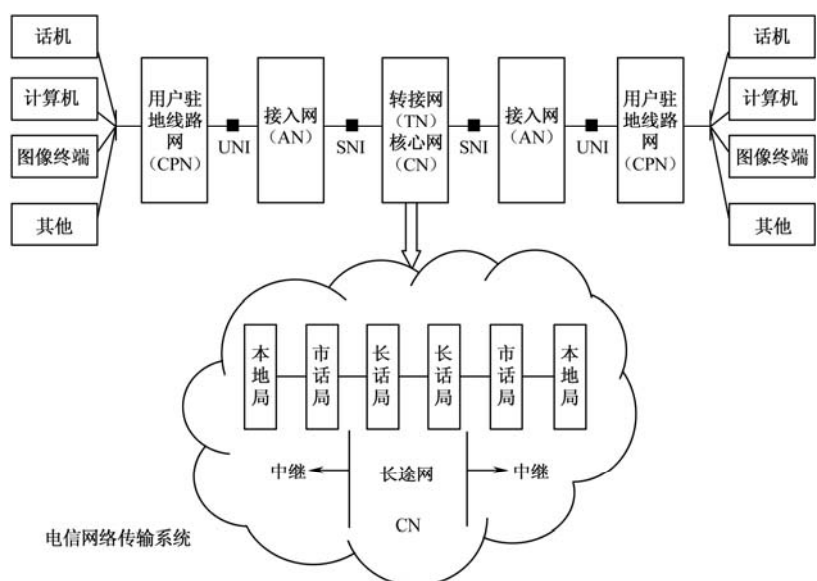


图 7-1 接入网在整个通信网中的位置

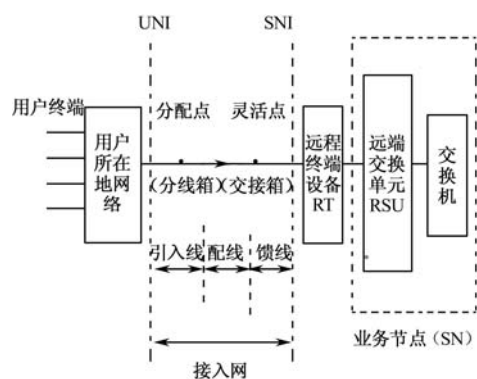


图 7-2 接入网的参考模型

2. 接入网的分层模型

为了便于网络设计与管理，接入网以 ITU-T 建议 G.802 的分层模型为基础，对 AN 按垂直方向分为 3 个独立的层次，即电路层（CL）、通道层（TP）和传输媒质层（TM），如图 7-3 所示。在网络分层后，每一层仍显得很复杂，因此可以进一步将每一层网络划分为若干个子网，每一个子网又可以进一步分割成若干个更小的子网。

1) 电路层

电路层网络涉及电路层接入点之间的信息传递并独立于传输通道层。电路层网络直接面向公用交换业务，并向用户直接提供通信业务，例如：电路交换业务、分组交换业务和租用线业务等，按照提供业务的不同可区分不同电路层设备。

2) 通道层

通道层网络涉及通道层连接点之间的信息传递并支持一个或多个电路层网络，通道层

网络的设备包括 PDH，SDH 及其他传输设备。通道的建立由交叉连接设备负责。

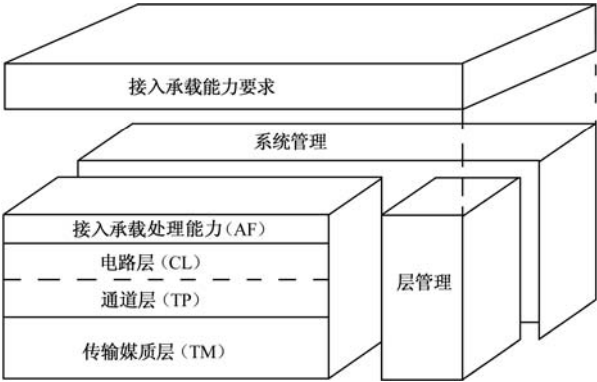


图 7-3 接入网的通用协议参考模型

3) 传输媒质层

传输媒质层网络与传输媒质（如光缆、金属线和微波）和接入系统（光纤、电缆和无线混合等接入系统）有关，它支持一个或多个通道层网络，为通道层网络节点（如交叉连接设备）之间提供合适的通道容量。

对于接入网而言电路层上面有接入承载处理能力（AF），其功能是确定业务节点接口结构；还有接入承载能力要求，其功能是用户承载、用户信令、控制和管理；另外还有层管理和系统管理功能。

3. 接入网的主要功能

接入网主要功能有 5 项，即用户口功能（UPF），业务口功能（SPF），核心功能（CF），传输功能（TF）和 AN 系统管理功能（AN-SMF）。图 7-4 显示了一个 AN 功能结构模型。

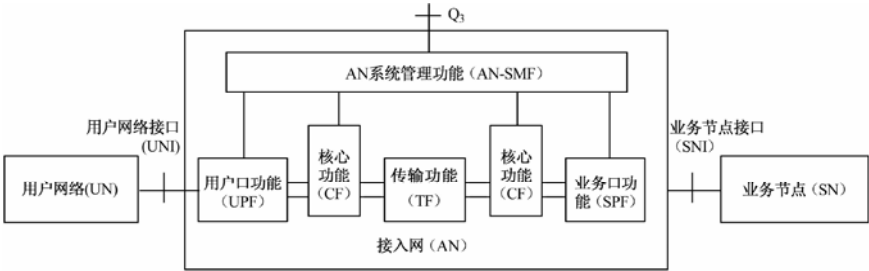


图 7-4 接入网功能结构

1) 用户口功能

用户口功能的主要作用是将特定的 UNI 要求适配到核心处理和管理功能。也就是 AN 可以支持多个不同的接入和要求特定功能的 UNI，具体功能包括：UNI 功能的终端，UNI 的激活/去激活，A/D 转换，UNI 的测试、管理控制等。

2) 业务口功能

业务口功能的主要作用是将特定 SNI 规定的要求与公用承载通路相适配，以便核心功能处理。另外还负责选择有关的信息，以便在 AN 系统管理功能中进行处理。具体功能包括：

SNI 功能终端，将所承载通路的要求、即时管理和操作要求映射核心功能，必要时可对特定 SNI 进行协议的转换，SNI 的测试和 SPF 的维护，还有相关的管理和控制功能。

3) 核心功能

核心功能位于 UPF 和 SPF 之间，其主要作用是负责将各用户口承载通路或业务口承载通路的要求与公用传输承载通路适配，还负责为通过 AN 传输所需要的协议适配和复用所进行的对协议承载通路的处理。核心功能可以分散在 AN 之中，具体功能包括：接入承载通路处理功能，承载通路集中，信令和分组信息复用，ATM 承载通路的电路模拟，管理和控制功能。

4) 传输功能

传输功能的主要作用是为 AN 中不同地点之间提供网络连接和传输媒质适配。具体功能包括：复用功能，交叉连接功能（包括疏导和配置），管理功能，物理媒质功能。

5) AN 系统管理功能

AN 系统管理功能（AN-SMF）的主要作用是协调 AN 内 UPF,SPF,CF 和 TF 的指配、操作和维护。也负责协调用户终端（经 UNI）和业务节点（经 SNI）的操作功能。具体功能包括：配置和控制，指配协调，故障检测和指示，用户信息和性能数据收集，安全控制，协调 UPF 和 SN（经 SNI）的应急管理和操作功能，资源管理，通过 Q3 接口与 TMN 互通，以接受监视和控制。

4. 接入网的类型

接入网根据传输方式可分为有线接入网和无线接入网两大类，如表 7.1 所示。有线接入网分为铜线接入网、光纤接入网、混合接入网；无线接入网又分为固定接入网和移动接入网。

表 7.1 接入网的类型

接入网	有线接入网	铜线接入网	数字线对增益（DPG） 高比特数字用户线（HDSL） 不对称数字用户线（ADSL）	
		光纤接入网	光纤到路边（FTTC） 光纤到大楼（FTTB） 光纤到户（FTTH）	
		混合光纤/同轴电缆接入网（HFC）		
	无线接入网	固定无线接入网	微波	一点多址（DRMA） 固定无线接入（FWA）
			卫星	甚小型无线地球站（VSAT） 直播卫星
		移动接入网	无绳电话 移动通信 卫星通信 集群调度	
	综合接入网	交互式数字图像（SDV） 有线+无线		

铜线接入网中应用了两种新技术,即高速率数字用户线(HDSL)和非对称数字用户线(ADSL)。光纤接入网中主要有光纤到户(FTTH)、光纤到路边(FTTC)和光纤到大楼(FTTB)等几种传输结构。混合接入网即混合光纤/同轴电缆(HFC)。无线接入网技术有微波、卫星、无绳电话、数字蜂窝移动等技术。本章只重点介绍光纤接入网组网及其工作原理。

7.1.2 光纤接入网基本网元设备

光纤接入网(OAN)是以光纤作为传输媒质,并利用光波为载波实现信息传输的网络。由于光纤具有传输带宽宽,传输衰减小的突出优点,因而成为现代通信网中长途干线、局间中继传输的主要手段。光通信的继续发展,必然向接入网延伸,这是现代通信网实现全光通信的需要。而且只有引入光纤接入网,才能从根本上解决接入网的“瓶颈效应”问题,才能真正实现信息高速公路,所以,光纤接入网是接入网发展的必然趋势。

光纤接入网的主要特点是:可以传输宽带交换型业务,且传输质量好,可靠性高;网径一般较小,可不需要中继器,但由于众多用户的光功率分配所需光功率大,可能需要采用光纤放大器进行功率补偿;市场前景良好,应用范围广阔;投资成本大,网络管理复杂,远端供电较复杂等。

光纤接入网的业务有:2 Mb/s 以下速率的窄带业务,主要包括普通电话业务,租用线业务,分组数据,ISDN 基本速率接入(BRA),ISDN 一次群速率接入(PRA), $N \times 64$ kb/s, 2 Mb/s(成帧和不成帧);此外还支持宽带业务,如单向广播式业务(CATV)、IPTV、视频点播(VOD 或数据通信)双向交互式业务、有线广播电视的数据接入和计算机局域网接入等。

1. 光纤接入网功能参考配置

ITU-T G.982 建议提出了一个与业务和应用无关的光纤接入网的功能参考配置,如图 7-5 所示,它描述了构成光纤接入网的功能单元配置及其连接关系。

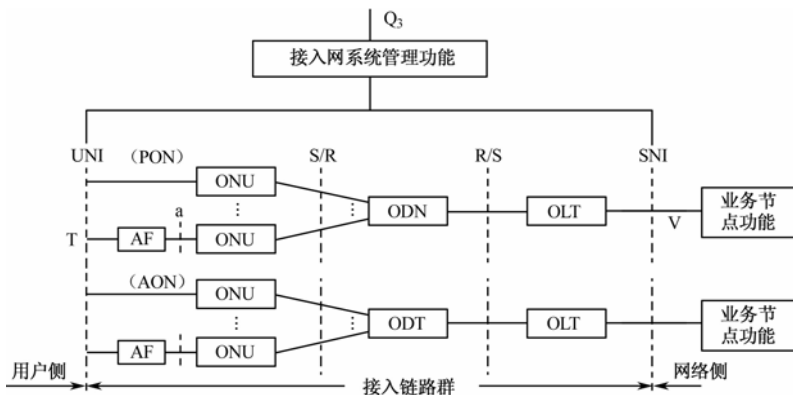


图 7-5 OAN 功能参考配置

由图 7-5 可知,光纤接入网的范围是从 V 接口(即业务节点接口 SNI)到 T 接口(即用户网络接口 UNI)。它由一个光线路终端(OLT),至少一个光配线网(ODN),至少一个

光网络单元（ONU）以及适配设施（AF）所组成，它可能包含若干与同一 OLT 相连的 ODN，它还包括光接入网的系统管理单元（OAM）。

图 7-5 的上下两部分分别代表不同光纤接入网，图的上部分为无源光网络 PON 功能参考配置，图的下部分为有源光网络 AON 功能参考配置，PON 和 AON 的区别在于 AON 中用有源器件组成的 ODT（如有源复用设备、光电中继器、远端集线器 HUB 等），而 PON 中用无源器件组成的 ODN（如光分路耦合器等）。本节重点介绍无源光网络 PON 接入技术。

OLT 的作用是为光接入网提供网络侧与光配线网之间的接口，并经一个或多个 ODN 与用户侧的 ONU 进行通信，OLT 与 ONU 的关系是主从通信关系，在北美，OLT 被称为局用数字终端（HDT）。OLT 还要分离交换和非交换业务，管理来自 ONU 的信令和监控信息，为 ONU 和本身提供维护和指配功能。OLT 可直接设置在本地交换机的接口处，也可以设置在远端。在物理上，OLT 可以是独立设备，也可以与其他功能集成在同一设备内。

ODN 为 OLT 与 ONU 之间提供光传输手段，其主要任务是完成光信号功率的分配。ODN 是由无源光器件、光纤光缆、光连接器和光分路器等组成的纯无源光配线网，通常采用树状结构。

ONU 的主要任务是终结来自 ODN 的光纤，并能处理光信号，为多个单位用户和居民住宅用户提供业务接口。ONU 的用户侧是电接口而网络侧是光接口，因此 ONU 具有光/电和电/光转换功能，还要完成对语音信号的数字化处理，复用、信令处理以及维护管理功能。其位置具有很大灵活性。根据 ONU 在光纤接入网中所处的不同位置，可以将 OAN 划分为几种不同的基本应用类型，即光纤到区段 FTTZ，光纤到路边 FTTC，光纤到大楼 FTTB，光纤到办公室 FTTO 以及光纤到家庭 FTTH。

AF 为 ONU 和用户设备提供适配功能，它既可以包含在 ONU 内，也可以完全独立。

OAM 为光接入网的操作管理与维护单元，它通过 Q3 接口与电信管理网（TMN）相连，与其进行通信并接受其管理。

OAN 可以进一步分为两种类型：一种是无源光网络（PON），另一种是有源光网络（AON）。两者的区别在于分路方式不同，前者采用无源光分路器进行分路，后者则采用电复用设备进行分路。这里只讨论 PON 的有关问题。

2. 光纤接入网基本网络单元设备

OAN 基本网络单元设备，一般按用途可分为：光线路终端设备（OLT），光配线网（ODN）和光网络单元（ONU）3 种类型。

1) OLT

OLT 提供与光配线网 ODN 之间的光接口。OLT 可以与本地交换机共处一地，也可以安装在远端。OLT 提供必要的手段来传递不同的业务给 ONU，其功能块如图 7-6 所示。

OLT 功能结构由 3 部分组成，即核心部分、业务部分和公共部分。

（1）OLT 核心部分功能包括数字交叉连接（或二层交换）功能，即为 OLT 的 ODN 侧和网络侧的可用带宽提供交叉连接能力；传输复用功能提供 ODN 上的发送和接收业务通路和必要的复用和解复用功能；ODN 接口功能为各种光纤类型提供一系列物理光接口，并实现光/电和电/光转换。

（2）OLT 业务部分功能主要实现业务端口功能。业务端口至少应能携带 ISDN 一次群

速率，并能配置成至少提供一种业务或同时支持两种或多种不同业务。

(3) OLT 公共部分功能包括供电和操作管理与维护 (OAM) 功能。其中，供电功能将外部电源转换为 OLT 所需要的各种电压；OAM 功能提供资源共享控制、OLT 的维护功能等。OAM 功能类别包括配置、性能、故障、安全和计费管理。它可通过 Q3 接口与电信管理网 TMN 相连。

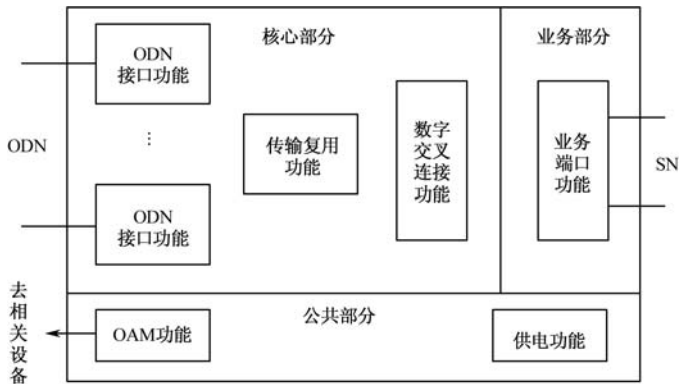


图 7-6 OLT 功能结构

2) ODN

光分配网络 ODN 位于 ONU 和 OLT 之间，为 ONU 和 OLT 提供以光纤为传输媒质的物理连接，如图 7-7 所示，它是由无源光器件组成的无源光分配网。主要的无源光器件有：单模光缆或单模带状光缆、光连接器、光分路耦合器 (OBD)、光衰减器和光纤接头。

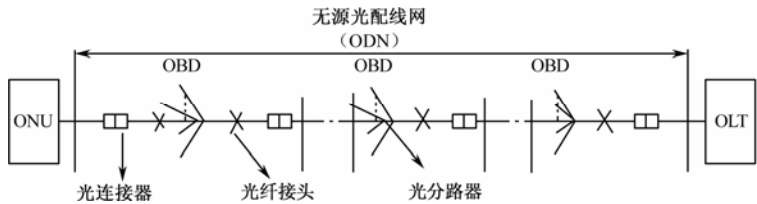


图 7-7 ODN 的光通道

ODN 的结构一般为点到多点连接，即多个 ONU 通过 ODN 与一个 OLT 相连，此时需要光分路耦合器，也可以使用光纤放大器来补充光能量，以延长传输距离和扩大服务用户数目，这样多个 ONU 可以共享同一光传输系统，从而节省了成本。

3) ODT

在有源光分配网中，由有源光器件组成的光远程终端位于 ONU 和 OLT 之间，为 ONU 和 OLT 提供以光纤为传输媒质的物理连接，其主要功能是完成光信号的功率分配任务。

4) ONU

ONU 位于 ODN 和用户终端之间，它提供与 ODN 之间的光接口和与用户终端之间的电接口，因此需要具有光/电变换功能，并能实现对各种电信号的处理与维护功能。

ONU 的功能结构也由核心部分、业务部分与公共部分组成，如图 7-8 所示。

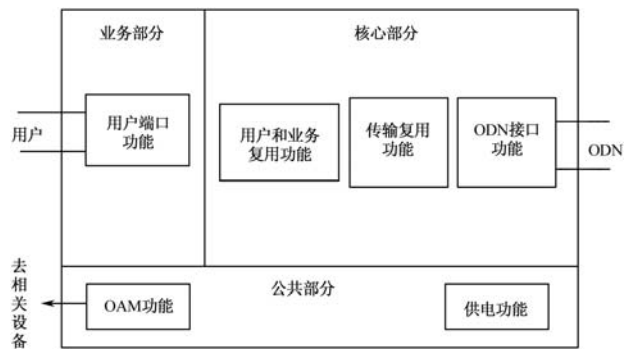


图 7-8 ONU 的功能结构

(1) ONU 核心部分功能包括：用户和业务复用功能，传输复用功能，ODN 接口功能。其中，用户和业务复用功能对来自和送给不同用户的信息进行组装与拆卸，并与不同的业务接口功能相连接；传输复用功能为来自和送给 ODN 接口的信号进行评估与分配，提取与输出和 ONU 相关的信息；ODN 接口功能则提供一系列物理光接口，与 ODN 相连的一系列光纤连接，并实现包括光/电与电/光转换。

(2) 业务部分功能主要提供用户端口功能，即提供用户业务接口并将其适配到 64 kb/s 或 $N \times 64$ kb/s。这一功能可以提供给单个用户，也可以提供给一群用户。另外，用户端口功能还能按照物理接口来提供信令转换功能，如信令的 A/D 与 D/A 转换等。

(3) ONU 公共部分功能包括供电功能和 OAM 功能，这一点与 OLT 公共部分功能相同。

3. 实用光纤接入网的基本构成

实用光纤接入网如图 7-9 所示，各功能模块的实现简介如下所述。

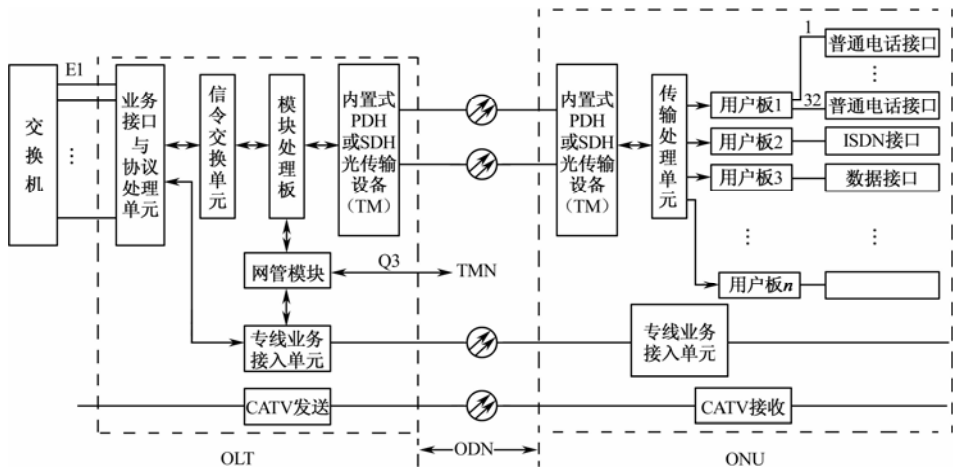


图 7-9 实用光纤接入网基本构成

1) OLT 结构功能

构成 OLT 的主要硬件模块有：业务接口与协议处理单元、信令交换单元、模块处理板、内置式 PDH 或 SDH 光传输设备、网管模块、专线业务接入单元和 CATV 发送单元。

业务接口与协议处理单元主要处理接口协议，提供接入网和公用交换网之间的标准接

口,实现协议控制。例如一个业务接口与协议处理单元上有8个(最多96个)E1接口,将8个E1通路的话务信号和信令复接成2个8 196 kb/s信号,送至信令交换单元进行交换、接续处理。

信令交换单元为OLT控制层中的单板,主要完成系统的时钟同步。该板由外部输入的时钟基准信号锁相产生系统所需的各种同步时钟信号,当所有外部时钟基准信号消失时,自动切换为内部三级时钟,同时还完成4096×4096时隙的交换业务及信令交叉连接、会议电话以及信号音产生功能。

模块处理器板是OLT的中央处理机,主要完成呼叫处理,负责前、后台数据命令的传输,实现与各子单元的通信功能。通常设有两块模块处理器板,采用热备份的主备方式,在主备切换时,提供通话保护功能。

内置式PDH或SDH光传输设备主要完成数字复用、电/光或光/电转换功能。

网管模块是提供网络管理单元接口,包括集中网管接口、Q3接口等。

专线业务接入单元是为专用业务提供数据特殊接口,通过光纤可将专线业务传到ONU中的专线业务接入单元。

CATV发送单元是内置光发射机,把来自广电中心的电信号变成光信号,通过光纤传到各ONU中。

2) ONU结构功能

构成ONU主要硬件模块有:内置式PDH或SDH光传输设备、传输处理单元、用户板等。

内置式PDH或SDH功能与OLT中该设备相对应。

传输处理单元用于管理用户层,同时完成数字中继电路管理和对用户板的扫描功能。它主要由E1接口电路、数字交叉连接单元、用户板扫描电路、存储器、控制器、可编程控制电路、总线驱动电路等几部分组成。

传输处理单元是将来自光传输设备输出的E1信号,通过E1接口电路连接到数字交叉连接单元参与随机的分配时隙交叉连接,然后送至用户板扫描电路对用户在线状态扫描,完成PSTN呼叫流程控制、112测试控制、ISDN呼叫消息通路、接入网内部通信等功能。

通常一个ONU插入两块传输处理单元,采用互助方式进行工作,正常情况下它们以负荷分担的方式分别管理相应的用户板,当系统发生异常情况时(如某一块传输处理单元异常),在OLT的控制下切换。切换时工作正常的传输处理单元强行使工作异常的传输处理单元退出运行并交出相应的系统控制权。

用户板类型可以是模拟用户板、数字用户板、数据接口用户板等。

模拟用户板是完成用户电路具备“BORSCHT”7项基本功能,即馈电功能,振铃功能,监视用户口的直流工作状态功能,由CODEC芯片完成语音的A/D、D/A变换的编译码功能,并且一块模拟用户板对外可提供32条用户线,二/四线混合转换功能,提供内、外侧接口的测试功能。

数字用户板主要功能提供ISDN基本速率接口,负责接收/发送2B+D数据,并实现U接口侧2B1Q的码流格式与交换机侧PCM码流格式的相互转换,例如一块数字用户板可提供8路数字用户接口。

数据接口用户板主要提供小于64 kb/s的同步/异步子速率数据的接入及复用,例如一块

数据接口用户板可提供 4 路数据接口。

3) ODN 结构

ODN 由光纤及相应光无源器件构成，为 OLT 与 ONU 之间提供光传输通道。

7.1.3 光纤接入网的拓扑结构

无源光网络（PON）接入网的拓扑结构主要有总线型、环状和星状，由此又可以派生出其他形式的结构。

1. 星状结构

图 7-10 为光纤接入网中的无源多星状结构，这种结构是传统的 CATV 网中通常采用的结构，它特别适合于单向广播业务。

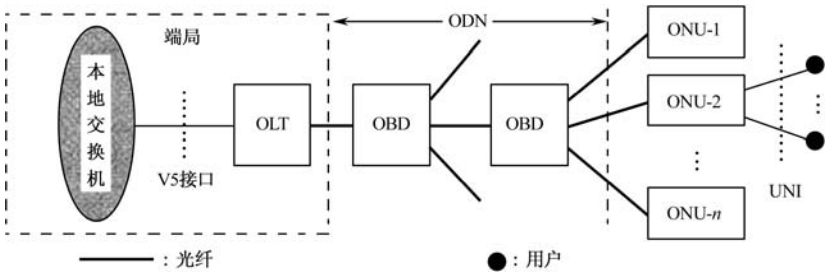


图 7-10 星状结构

无源光分路器（OBD）的作用是，对从 OLT 到 ONU 的下行光信号进行分路，对从 ONU 到 OLT 的上行光信号进行合路。来自 OLT 的光信号通过 OBD 向多个 ONU 广播，而由多个 ONU 发来的光信号由同一个 OLT 接收，从而形成了双向一点到多点传输系统。

无源多星状结构又被称为树状结构，OLT 是树根，OLT 到 OBD 的光纤连接是树干，一个 OBD 到多个 ONU 的光纤连接是树枝。到达一个树干连接的所有 ONU 的光能量，都是由 OLT 的光源提供的，因此，光源的光功率预算要限制其连接的 ONU 的数量以及传输距离。

星状结构的优点是网络对所传输的业务具有透明性，它对传输信号的制式、带宽以及波长和传输方法没有任何限制，因此适合于未来新业务的引入。用户可以共享光缆馈线段和配线段，以及端局的发送光源，因而使成本下降，带来经济上的好处；缺点是功率损失大，双向通信难度大。

2. 总线型结构

图 7-11 为光纤接入网的总线型结构，这也是一种点到多点传输系统的配置结构。这种结构的特点是，所有 ONU 通过非平衡光分路器（NB-OBD）使用同一光纤馈线。非平衡光分路器的作用是从光纤总线上，选出 OLT 送给与之相连的 ONU 的信号，并将 ONU 送来的信号插入光纤总线送给 OLT，其分路比由具体使用情况来决定。

这种结构特别适合于 CATV 等分配型业务，全部传输设施可以为所有用户共享。从端局发出的信号可以为所有用户接收，每个用户根据预先分配的时隙选出属于自己的信号，因此只要总线带宽足够宽，不仅传输低速双向通信业务没有问题，而且传输分配型宽带业务也没有问题。

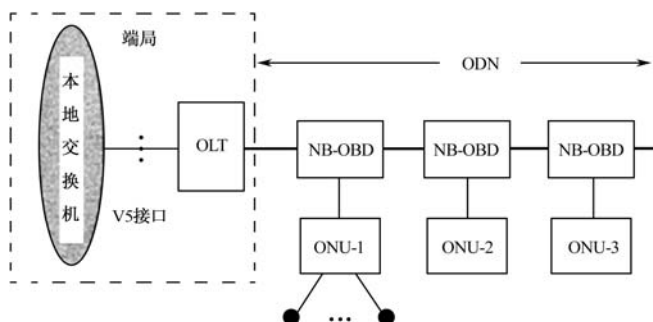


图 7-11 总线型结构

3. 环状结构

图 7-12 为光纤接入网的环状结构，它可以看成封闭的总线型结构，与总线型结构相比，其可靠性大大提高。

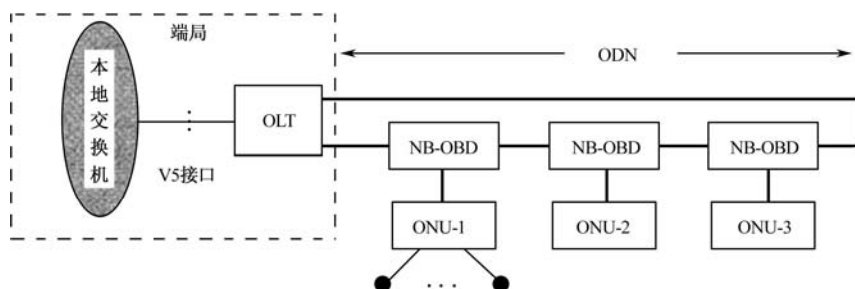


图 7-12 环状结构

如果将无源光分路器用分插复用器（ADM）替代，这种环状结构可形成一种可靠性很高的单向通道倒换保护自愈环状网，其保护原理如第 5 章所述。

7.2 无源光网络（PON）接入网

PON 功能结构由 OLT、ODN 和 ONU 组成，如图 7-10~7-12 所示。

7.2.1 PON的种类

PON 是实现宽带光接入的一种常用网络形式，从概念的提出到现在已有 20 多年的时间。在这期间；人们根据 PON 的独特物理结构，提出了一些标准和规范。按承载的内容来分类，PON 主要包括基于 ATM 的无源光网络（APON）/宽带无源光网络（BPON），基于 Ethernet（以太网）的无源光网络（EPON），基于 GFP（通用成帧规程）的吉比特无源光网络（GPON）等。它们主要差异在于采用了不同的二层交换技术，APON 二层交换采用的是 ATM 技术，最高速率为 622Mb/s；EPON 二层交换采用的是 Ethernet 技术，可以支持 1.25G b/s 速率，将来速率还能升级到 10Gb/s；GPON 二层交换则采用 GFP（通用成帧规程）对 Ethernet、TDM

和 ATM 等多种业务进行封装映射技术。下面将分别加以介绍。

1. APON

APON, 即 ATM-PON, 是 20 世纪 90 年代中期由 FSAN (全业务接入网联盟) 开发完成的, 并提交给 ITU-T 形成了 G.983.x 标准系列。APON 下行传输速率一般为 622Mb/s, 上行一般为 155 Mb/s, 传输距离最大 20 km, 带宽被 32~64 个 ONU 所分享, 每个 ONU 只能得到 5~20 Mb/s。由于采用了 ATM 技术, 因此可承载 64 kb/s 语音业务、ATM 业务和 IP 业务等各种业务类型, 并可提供强有力的 QoS 保证。

APON 经过多年的发展, 并没有能够很好地占领市场, 主要原因是 ATM 协议复杂, 使 APON 的推广受到很大阻碍, 另外其设备价格较高, 相对于接入网市场来说还较昂贵。但 APON 可提供丰富的业务类型, 能够较容易地满足 FTTH 的最高业务需求 Triple Play 并能提供业务质量保证。从设备成熟度看, APON 设备也是目前最成熟的 PON 设备, 在业务承载能力、性能稳定性和管理维护功能方面都比较成熟。作为业界最早出现的宽带 PON 技术, APON 拥有 Motorola, Terawave 和 Optical Solution 等众多厂商的支持, 烽火通信、华为等国内厂商也都推出了实用化的 APON 产品。

2. EPON

EPON, 即 Ethernet-PON, 2004 年在 IEEE 802.3ah 标准中正式进行规范, 它在 PON 层上以 Ethernet 为载体, 上行以突发的 Ethernet 包方式发送数据流。EPON 可提供上下行对称 1.25 Gb/s 传输速率以及下行可达到 10 Gb/s 的传输速率。

在多种基于 PON 的技术中, EPON 由于其技术和价格方面的优势已逐渐成为最受欢迎的 FTTH 技术。由于采用 Ethernet 封装方式, 因此非常适于承载 IP 业务, 符合 IP 网络迅猛发展的趋势, 这也是 EPON 技术能够获得业界青睐的重要原因。

3. GPON

GPON, 即 Gigabit-PON。ITU-T 针对 APON 技术未能获得成功的原因, 以 APON 标准为基本框架, 重新设计了新的物理层传输速率和 TC 层, 发布了 G.984.x 系列的 GPON 标准。GPON 的下行最大传输速率可高达 2.488 Gb/s, 上行最大传输速率达 1.244Gb/s, TC 层可采用 ATM 和 GEM 两种封装方式。GEM 为 GPON 特有的 TC 层适配协议, 它的提出源于 GFP 的通用成帧思想, 同时考虑到 PON 网络多 ONU、多端口复用的情况, 引入了 Port ID。此外, GEM 借鉴了 GFP 的帧同步机制, 采用自描述方式确定帧边界。由于采用了 GEM 封装方式, GPON 的封装是高效透明的。在业务承载能力上, GPON 延续了 APON 的全业务接入理念, 其特有的 TC 层封装方式也完全能支持 QoS 保证。

ITU-T 制定的 GPON 系列标准相当完善, 但同时也相当复杂, 标准正式发布至今, 全球只有屈指可数的几家公司如 Flex Light, BroadLight, OpticalSolution 等宣布推出符合 G. 984 标准的 GPON 产品, 并且多采用 GEM 封装模式。由此带来的是 GPON 产品的价格相对较高, 在现阶段将 GPON 应用到 FTTH 中有很大的价格压力。

7.2.2 APON, GPON, EPON接入技术比较

1. APON, GPON, EPON分层上的区别

各种 PON 分层区别如图 7-13 所示。

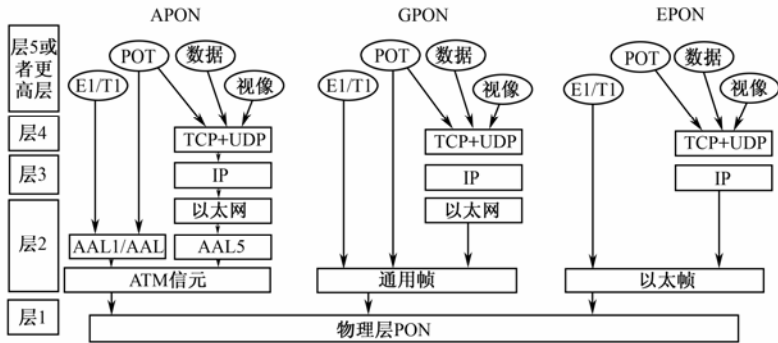


图 7-13 APON, GPON, EPON 3 种接入技术在分层上的区别

从图 7-13 可以看出各种 PON 技术由于第 2 层的不同，导致数据封装帧差别，当然各种 PON 支持的协议标准也就不同。

2. APON, GPON, EPON的特点

(1) APON 是全业务网络联盟 FSAN 开发完成的，并提交给 ITU-T 形成了 G.983 标准化，以 ATM 格式封装数据，是目前标准化最完善的，但没有得到市场认可。

APON 技术具备综合业务接入、QoS 服务质量保证等独有的特点；由于标准化时间较早，已有成熟商用化产品等优点。当然 APON 技术也存在利用 ATM 信元造成的传输效率较低；带宽受限；系统相对复杂、价格较贵；需要进行协议之间的转换等缺点。

APON 适用于对带宽要求不高、对业务质量要求高或者需要运行混合业务的企事业单位的接入。

(2) EPON 是 2004 年在 IEEE 802.3ah 标准中正式进行规范的，它采用以太网封装。在 EPON 中，根据 IEEE 802.3 以太网协议，传送的是可变长度的数据包。由于以太网适合携带 IP 业务，与 APON 相比，极大地减少了传输开销。国内标准已经制定完成，产品开始在市场上迅速应用。

EPON 能够提供高达 1 Gb/s 的上下行带宽，传输距离最大可达到 20km。支持的光分路比大于 16。EPON 融合了 PON 和以太网的优点，系统结构更简化，标准宽松，成本更低。EPON 技术目前仍难以支持实时业务的服务质量，在安全性、可靠性等方面与电信级的服务相比仍有差距。

EPON 主要面向对带宽要求高、对业务质量和网络安全要求不是太高、对成本敏感的以太网业务为主的中小型企事业单位的接入，如果成本进一步下降，也将作为 FTTH 的主要手段直接面向高端个人用户。

（3）GPON 是 2002 年 9 月 FSAN 提出的，具有前所未有的高比特速率，能以原有格式（透传）和极高效率传输多种业务。并于 2003 年 1 月由 ITU-T 颁布 GPON 新标准 G.984。以 ATM、GEM 封装，尽管标准已经完成，但支持厂家极少。

GPON 技术针对 1 Gb/s 以上的 PON 标准，除了对更高速率的支持外，还有一种更佳、支持全业务、效率更高的解决方案。引入通用成帧协议（GFP），能将任何类型 and 任何速率的业务进行原有格式封装后经由 PON 传输，而且 GFP 帧头包含帧长度指示字节，可用于可变量长度数据包的传递，大大提高了传输效率。因此能更简单、通用、高效地支持全业务。GPON 提供 1.244 Gb/s 和 2.488 Gb/s 的下行速率和所有标准的上行速率。传输距离可达 20 km（逻辑 60 km），支持的光分路比在 64~128 之间。

GPON 适合于少数对带宽要求高、需要提供电信级服务质量，且对成本不敏感的多业务需求的企事业单位的接入。

将上述 APON, GPON, EPON 标准及主要参数比较，归纳于表 7.2 所示。下面重点对目前广泛应用的 EPON 系统结构、工作原理、帧结构和关键技术等进行介绍。

表 7.2 APON、GPON、EPON 的标准及主要参数比较

		APON	EPON	GPON
相关标准组织		TIU-T G983.1	IEEE 802.3ah	TIU-T G984
支持速率等级	下行	622 Mb/s 或 155 Mb/s	1.25 Gb/s	1.25 Gb/s 或 2.5 Gb/s
	上行	155 Mb/s	1.25 Gb/s	155 Mb/s、622 Mb/s 1.25 Gb/s 或 2.5 Gb/s
最大传输距离		10~20 km	10~20 km	10~60 km
协议及封装格式		ATM 封装	以太网封装	ATM 或 GEM
光分路比		32~64	16~32	64~128
业务能力		TDM、ATM	Ethernet、TDM	Ethernet、ATM、TDM
技术标准化程度		非常最完善	完善	一般
OAM 能力		具备	具备	具备
市场推广		没有得到市场认可	市场上迅速应用	支持厂家极少

7.3 EPON系统结构及原理

以太网无源光网络（EPON）是一种采用点到多点（P2MP)结构的单纤双向光接入网络，其典型拓扑结构为树形。

7.3.1 EPON系统结构

EPON 系统由局侧的光线路终端（OLT）、用户侧的光网络单元（ONU）和光分配网络（ODN）组成，为单纤双向系统，EPON 系统的结构如图 7-14 所示。

在 EPON 系统中，OLT 位于网络侧，放在中心局端，既是一个二层交换机或路由器，又是一个多业务提供平台（MSPP），它提供网络集中和接入，能完成光 / 电转换、带宽分

配和控制各信道的连接, 并有实时监控、管理及维护功能。根据以太网向城域和广域发展的趋势, OLT 将提供多个 Gb/s 和 10 Gb/s 的以太网接口, 支持 WDM 传输。OLT 还支持 ATM 的连接, 若需要支持传统的 TDM 话音、普通电话线(POTS)和其他类型的 TDM 通信(T1/E1), OLT 可以连接到 PSTN。OLT 根据需要可以配置多块光线路板, 通过光分路耦合器 BDO 分线率为 1:8, 1:16 或 1:32 与多个 ONU 连接。

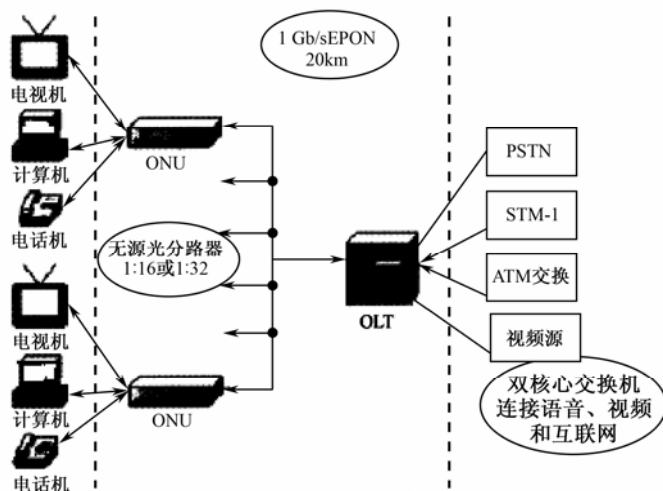


图 7-14 EPON 的系统结构

在 EPON 中, 从 OLT 到 ONU 距离最大可达 20 km, 若使用光纤放大器, 传输距离还可以扩展。

EPON 中的 ONU 位于用户侧, 采用以太网协议, 实现了成本低廉的以太网第二层第三层交换功能。此类 ONU 可以通过层叠来为多个最终用户提供共享高带宽。在通信过程中, 不需要协议转换, 就可实现 ONU 对用户数据透明传送。ONU 也支持其他传统的 TDM 协议, 在带宽更高的 ONU 中, 将提供大量的以太网接口和多个 T1/E1 接口。对于光纤到家 (FTTH) 的接入方式, ONU 和 UNI 可以被集成在一个简单设备中, 不需要交换功能, 用极低的成本给终端用户分配所需的带宽。

7.3.2 EPON 系统的工作原理

在 EPON 中, OLT 传送下行数据到多个 ONU, 完全不同于从多个 ONU 上行传送数据到 OLT。上下行传送采用不同的技术, 下行采用 TDM 传输方式; 上行采用 TDMA 传输方式。

EPON 在单根光纤上采用下行 1550 nm/上行 1310 nm 波长组合的波分复用技术(WDM), 上行方向 (ONU 至 OLT) 是点到点方式, 即 ONU 发送的信号只会到达 OLT, 而不会到达其他 ONU。为了避免数据冲突并提高网络利用效率, 采用仲裁机制。仲裁机制就是指上行方向采用 TDMA 多址接入方式, TDMA 按照严格的时间顺序, 把时隙分配给相应 ONU。每个 ONU 的上行信息填充在指定的时隙里, 只有时隙是同步的, 才能保证从各个 ONU 的上行的信息不发生重叠或碰撞, 以此保证在 OLT 中正确接收。如图 7-15 所示, ONU₃ 在第

1 时隙发送包 3，ONU₂ 在第 2 时隙发送包 2，ONU₁ 在第 3 时隙发送包 1。

下行方向（OLT 至 ONU）将数据以可变长度数据包通过广播传输给所有在 ODN 上的各个 ONU。每个包携带一个具有传输到目的地 ONU 标识的信头。当数据到达 ONU 时，由 ONU 的 MAC 层进行地址解析，提取出属于自己的数据包，丢弃其他数据包，如图 7-15 所示。

EPON 的上、下行信息速率均为 1 Gb/s（由于其物理层编码方式为 8B/10B 码，所以其线路码速率为 1.25 Gb/s）。

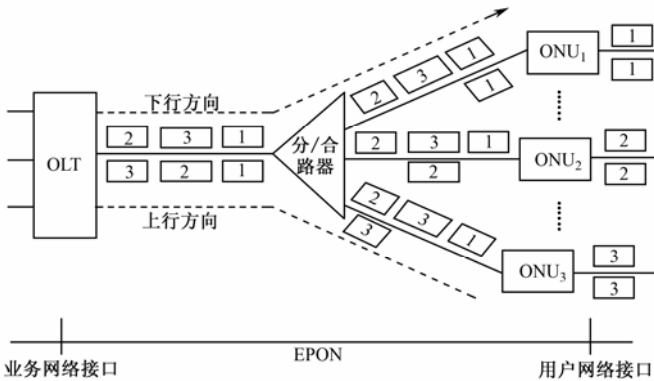


图 7-15 EPON 上下行信息流的分发

7.3.3 EPON帧结构

EPON 的上行接入采用中央控制按需分配的 MAC 协议，使用标准的以太网帧结构。

（1）EPON 下行帧结构。EPON 下行信息流是符合 IEEE 802.3 帧格式的变长数据包，其传输速率为 100 Mb/s 或 1000 Mb/s。图 7-16 为 EPON 从 OLT 到 ONU 的下行传送信息流的帧结构，下行帧周期为 2 ms，每一帧有多个可变长度的数据包，每个数据包又包括信头、可变长度的载荷、误码检测域和同步标示符。其中，同步标示符占用一个字节的编码，含有时钟信息，用作同步标记，每隔 2 ms 一次，以便使 ONU 与 OLT 同步。图中 1, 2, N 表示该数据包发送到 ONU 的编号，也就是编号为 1 的数据包发送给编号为 1 的 ONU，编号为 N 的数据包发送给编号为 N 的 ONU，以此类推。

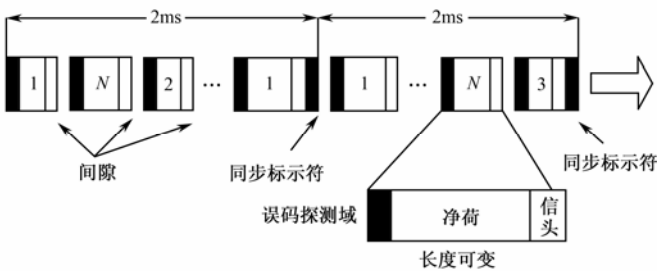


图 7-16 EPON 的下行帧结构

（2）EPON 上行帧结构如图 7-17 所示，帧长为 2 ms，分成 N 个时隙，并进行 1 到 N 的编号，每个时隙都对应着相同编号的 ONU 发出的信息，如图 7-15，标出的第 3 个时隙就对

应第 1 号的 ONU 发出的信息。由图可知，每个 ONU 的时隙包括两个可变长度的载荷和一些时隙开销，其中时隙开销包括保护带、定时指示和光信号功率指示。当时隙中没有信息传输时，将由无用信息填充。

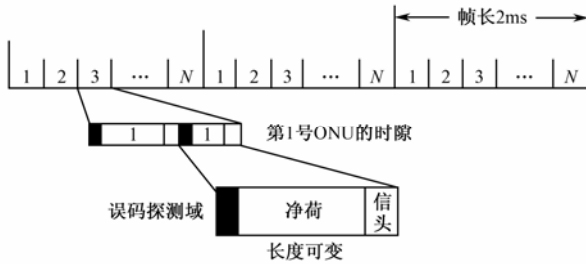


图 7-17 EPON 的上行帧结构

7.3.4 EPON关键技术

实现 EPON 有许多关键技术有待解决，其中已经解决的关键技术如下。

1. 上行信道复用技术

上行的复用技术是 EPON 技术的核心，其中上行信道的带宽利用率，如何使时延和时延抖动等指标达到要求等是关键技术问题。上行带宽的分配方法，ONU 发送窗口是固定还是可变，最大的 ONU 发送窗口应为多大，ONU 发送窗口的间隔，以太网帧是否切割等问题都有待于进一步研究。

2. 测距和时延补偿技术

EPON 的上行帧包括众多的 ONU 发出的信息包，为了使各 ONU 发出的信息包不碰撞、不重叠，EPON 技术中采用精密测距技术，并调整各 ONU 的时延，使其 ONU 上行信息精确地进入指定的时隙里，以保证严格的帧结构和正确地接收。测距过程应充分考虑到整个 EPON 的配置情况。

由于光信号来自远近不同的 ONU，所以在时间上可能产生信号冲突，通过测距技术就可以消除这种冲突。EPON 上行传输采用 TDMA 方式接入，一个 OLT 可以接 16~64 个 ONU，ONU 至 OLT 之间的距离最短的可以是几米，最长的可达 20km。实现 TDMA 接入，必须使每一个 ONU 的上行信号在公用光纤汇合后，进入指定的时隙里，彼此间既不发生碰撞，也不要间隙太大，OLT 要不断地对每一个 ONU 与 OLT 的距离进行精确测定，以便控制每个 ONU 发送上行信号的时刻，要求测距精度为 $\pm 1\text{bit}$ 。

测距过程是：OLT 发出一个测距信息，此信息经过 OLT 内的电子电路和光电转换延时后，光信号进入光纤传输并产生延时到达 ONU，经过 ONU 内的光电转换和电子电路延时后，又发送光信号到光纤并再次产生延时，最后到达 OLT，OLT 把收到的传输延时信号和它发出去的信号相位进行比较，从而获得传输延时值。OLT 以距离最远的 ONU 的延时为基准，算出每个 ONU 的延时补偿值，并通知 ONU。该 ONU 在收到 OLT 允许它发送信息的

授权后，延时 t_d 补偿值后再发送自己的信息，这样各个 ONU 采用不同的 t_d 补偿时延来调整自己的发送时刻，以便使所有 ONU 到达 OLT 的时间都相同（基本与 APON 测距相似）。

3. 动态带宽分配

Ethernet 的帧结构，并不是固定的，根据 IEEE 802.3 协议，在不包括 8 个字节的帧头时，每帧中数据包最长的为 1518 字节，最短的为 64 字节。不同长度的帧填入相同长度的时隙，就给带宽分配带来了问题，怎么才能最高效率地分配带宽？国内对这方面的研究非常热门，目前大致有两种方法：一种是采取轮询的方式来进行带宽分配；另一种是采取请求一授权的方式进行实时带宽分配。感兴趣的读者可参见有关文献。

4. 突发信号的快速同步

OLT 接收到的信号为突发信号，原因是 EPON 上各个 ONU 到 OLT 的距离各不相同，所以各个 ONU 到 OLT 的路径传输损耗也互不相同，当各个 ONU 发送光功率相同时，到达 OLT 后的光功率互不相同。因此，OLT 的上行光接收机要用突发模式接收技术来保证能够接收大动态范围光功率。

由于突发模式的光信号来自不同的端点，所以可能导致光信号相位的偏差，消除这种微小偏差的措施是采用突发同步技术。只有 OLT 的上行方向采用突发光接收机，才能从接收到的突发脉冲串中的前几个比特快速地提取出同步时钟，进行突发同步。

5. 实时业务传输质量

传输实时语音和视频业务要求传输延迟时间既恒定又很小，时延抖动也要小。由于以太网技术的固有机理，不提供端到端的包延时、包丢失率以及带宽控制能力，因此难以支持实时业务的服务质量。如何确保实时语音和 IP 视频业务，在 EPON 传输平台上以与 ATM 和 SDH 的 QOS 相同的性能分送到每个用户，是函待解决的问题。目前 EPON 厂商正在着手解决这个问题，一种技术是对于不同的业务采用不同的优先权等级，对实时的业务优先传送。另一种技术是带宽预留技术，提供一个开放的高速通道，不传输数据，而专门用来传输语音业务，以便确保 POTS 业务的质量。

6. 安全性和可靠性

EPON 下行信号以广播的方式发送给所有 ONU，每个 ONU 可以接收 OLT 发送给所有 ONU 的信息，这就必须对发送给每个 ONU 的下行信号单独进行加密。OLT 可以定时地发出命令，要求 ONU 更新自己的密钥，OLT 就利用每个 ONU 发送来的新密钥对发送给该 ONU 的数据信元进行搅动加密，保证每个 ONU 从接收所有 ONU 的信息中，按照自己的密钥译出属于自己的信息，使下行信息安全地到达目的地，确保每个用户（ONU）的隐私。

为了防止有的用户对不属于自己的信息采用逐个试探的办法进行解密，需要对密钥定期更新。

7.3.5 EPON基本网络单元设备

EPON 基本网络单元设备有 OLT 设备、ONU 设备、光纤无源器件（包括光分路耦合器等）及光纤光缆等。在此只介绍 OLT 设备和 ONU 设备基本构成及原理。

1. OLT硬/软件结构

1) OLT 硬件结构及功能

OLT 设备结构主要由交换控制板、上行以太网板、上行窄带业务板、下行 EPON 接口板、环境监控板、IP 总线、TDM 总线、控制总线和电源线等组成，其硬件结构如图 7-18 所示。各类板通过总线互相连接，相互协调工作完成所有 OLT 的功能。

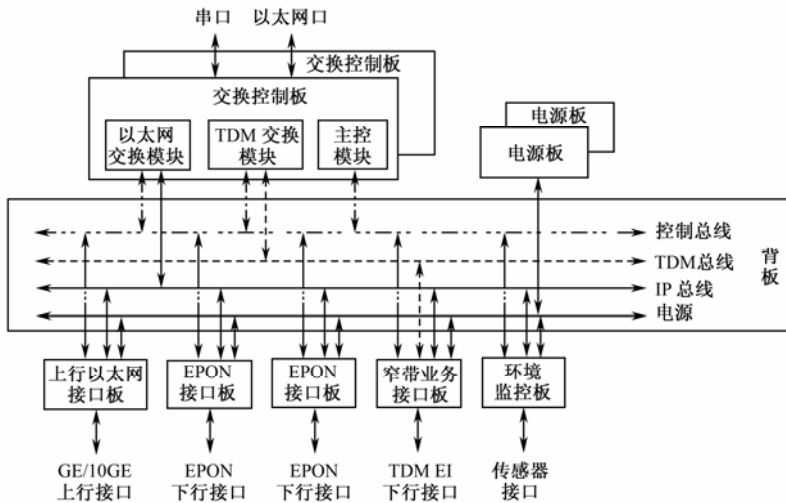


图 7-18 OLT 硬件结构

交换控制板的主要功能是负责业务管理、组播业务管理、IP（以太）和 TDM 交换。

上行以太网接口板由数据上行接口模块、相关光接口模块组成。

窄带业务接口板功能是实现 IP 语音到 TDM 语音之间的转换，以及窄带语音信令的处理（如 PRI 等）等。

EPON 接口板（即 EPON 业务接入板）是由 EPON 系列单板和光接口单板组成，提供 P2PFE 光接口和 EPON 接入业务。

2) OLT 的工作原理

OLT 的工作原理可根据信息流程进行描述。当上行数据从 ONU 经过 PON 接口进入 EPON 接口，经过该板进行 EPON 协议处理后，将 EPON 数据流恢复成以太网数据流，再经过 IP 总线到以太网交换模块处理后传到上行以太网接口卡上，完成上行数据业务的处理。

下行数据由上行以太网接口板进入 OLT 系统，传到以太网交换模块后，根据目的 MAC 地址确定相应的输出端口，并将数据转发至对应的 EPON 接口板上，再由 EPON 接口板经过 EPON 协议处理后向 ONU 转发。

系统对不同业务的处理流程有所不同。但过程基本类似，只是对于来自远端 ONU 的不

同业务通过不同接口板进入设备而已。

3) OLT 软件结构

OLT 软件结构即软件系统由主机软件和单板软件构成。主机软件运行在主控板上，完成硬件系统驱动，提供设备和业务管理的手段，它基本功能模块就是操作系统。单板软件运行在业务板、接口板、监控测试板及部分电源板上，为其单板提供管理、驱动和诊断等。

2. ONU硬件结构

1) ONU 硬件结构

通常 ONU 硬件设备包括主控模块、交换模块、总线、上行 EPON 接口模块、各种下行业务接口模块以及电源模块构成。各种模块通过背板总线进行互连，如图 7-19 所示。

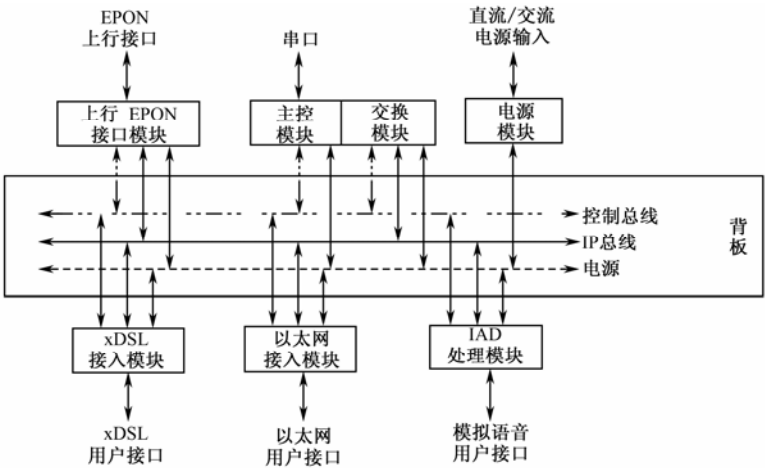


图 7-19 ONU 硬件结构

主控模块是 ONU 的控制和管理核心，一般为嵌入式操作系统（Linux/VxWork 等）的硬件平台。主控模块一般可以实现对交换模块以及其他接口模块的控制、配置和正常运行。

交换模块提供以太网帧的交换与转发功能，主控模块通过背板控制总线与交换模块进行通信、访问和管理。

2) ONU 工作原理

ONU 的工作原理可根据信息流程进行描述。上行 EPON 接口模块采用一个千兆口作为 EPON 的接收端口，接收 OLT 广播发送的数据分组；另一个千兆口作为 EPON 的发送端口，向 OLT 发送数据，该端口发射的是特殊波长的光，通过特殊的交换机制来实现 ONU 与 OLT 的连接。

xDSL 接入模块主要为用户提供 DSL 接入，将用户数据转换为标准以太网帧结构后，通过背板 IP 总线传送到交换模块，从而交换模块利用内部交换功能将用户数据转发到 ONU 上行接口。下行业务数据从 ONU 上行接口进入设备后，通过 IP 总线到达交换模块，经过内部交换将数据转发到 xDSL 模块，最后 xDSL 模块将信号进行调制等处理后发送给 xDSL 用户。

以太网用户接入模块主要为用户提供以太网接入，业务数据转发流程与 xDSL 模块相同。

IAD 模块主要向用户提供模拟语音业务。用户模拟语音 POTS 接口到达 IAD 模块后, IAD 模块将用户语音转换成 VoIP 数据包, 通过 IP 总线、交换模块等之后转发到 ONU 的上行接口。下行语音 VoIP 数据分组到达 IAD 模块后, 由 IAD 模块将其转换成用户模拟语音信号, 通过 POTS 接口发送给用户。

7.4 光纤接入网的应用

7.4.1 PON接入网应用

PON 的信号由端局和电视节目中心通过光纤和光分路耦合器直接分送到用户, 其网络结构, 如图 7-20 所示。其下行业务由光功率分配器以广播方式发送给用户, 在靠近用户接口处的过滤器让每个用户接收发给它的信号。在上行方向, 用户业务是在预定的时间发送, 目的是让它们分时地发送光信号, 因此要定期测定端局与每个用户的延时, 以便上行传输同步, 这是 PON 技术的难点。由于光信号经过分路器分路后, 损耗较大, 因而传输距离不能很远。

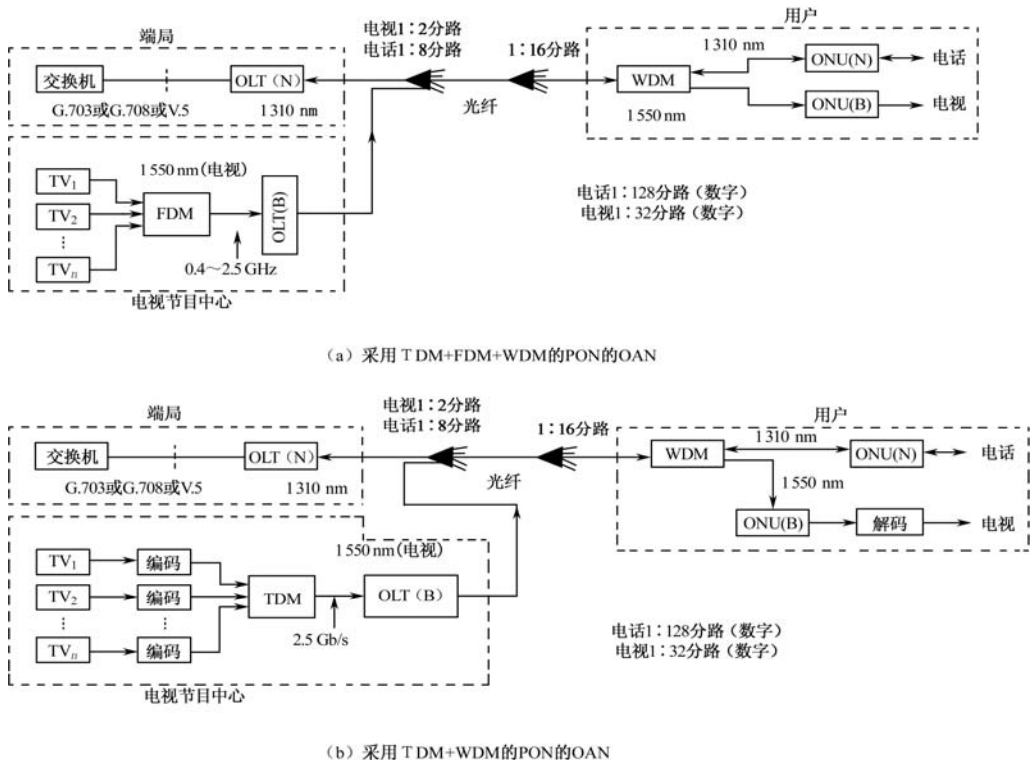


图 7-20 PON 的 OAN 结构

PON 的一个重要应用是传输宽带图像业务 (特别是广播电视), 这方面尚无任何国际标准可用, 但已形成一种趋势, 即使用 1310 nm 波长传输窄带业务, 而使用 1550 nm 波长传

输宽带图像业务。原因是 1310 nm/1550 nm 的 WDM 器件已很便宜，而且 1310 nm 波长的激光器也很成熟，价格便宜，适合于经济地传输窄带业务；另一方面 1550 nm 波长的光纤损耗低，又能结合使用光纤放大器，因而适合于传输带宽要求较高的宽带图像业务。具体的传输技术主要是频分复用（FDM）、时分复用（TDM）和密集波分复用（DWDM）3 种，图 7-20（a）使用 1310 nm/1550 nm 两波长 WDM 器件来分离宽带和窄带业务，其中 1310 nm 波长传输 TDM 方式的窄带业务信号，1550 nm 波长传输 FDM 方式的图像业务信号（主要是 CATV 信号）。图 7-20（b）也使用 1310 nm/1550 nm 两波长 WDM 器件来分离宽带和窄带业务，与图 7-20（a）的不同之处是它先将电视信号编码为数字信号，再用 TDM 方式传输。PON 中常用的多址技术有 3 种：频分多址（FDMA）、时分多址（TDMA）和波分多址（WDMA）。

7.4.2 TDD+TDM+TDMA的PON的OAN

美国 LT 公司的光本地网 OLN-2000 系统，采用 TDD 双工方式进行单纤双向通信；下行信号采用 TDM 复用方式进行广播发送；上行信号采用 TDMA 方式进行多址接入。

图 7-21 示出该系统的原理框图。它由 3 部分组成，即 OLT，ODN 和 ONU。该系统支持交互式与分配式两种业务。这两种业务分别工作于 1310 nm 和 1550 nm 波长。利用 WDM 器件完成合波与分波任务。图中，OLT-IS 和 ONU-IS 用交互式业务；OLT-DS 和 ONU-DS 用分配式业务。分配式业务主要用于电视，交互式业务主要用于电话。OLN-2000 的 OLT 与交换机的接口采用 V5.1 协议接口，这给系统的业务配置带来了灵活性。利用新的软件版本该接口还能升级到 V5.2 协议接口，进一步改进系统的经济性。在网络一侧，一个 OLT 可提供 6 个 PON 总线接口，其总容量虽然仍受限于网络侧的 16 个 2 Mb/s，但在应用上具有较大灵活性。每个总线接口最大可支持 192 个 64 kb/s 通路，且可接入网络侧宽带通路总线 512 个 64 kb/s 通路中的任何一个。在 512 个 64 kb/s 通路中，其中 480 个 64 kb/s 通路可用于实际业务通路。

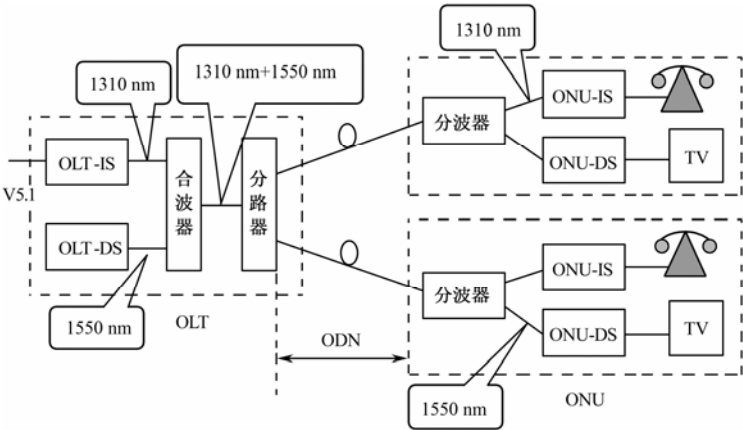


图 7-21 OLN-2000 系统原理框图

OLT 的定时可来自网络侧任何 2 Mb/s 支路接口，局内时钟或内部设备时钟。
OLT 与 ODN 的光接口速率为 28.8 Mb/s。每个光分路器最大可带 16 个 ONU。光路回

波损耗大于 35 dB，光功率预算值为 11~26.5 dBm，光工作波长窗口为 1270~1350 nm 交互式业务。

7.4.3 混合拓扑结构的HONET接入网

在一个城市中，采用 HONET 综合业务接入网提供宽带的信息服务，为信息高速公路打下基础，图 7-22 所示的是组成 HONET 综合业务接入网拓扑结构的一个范例。

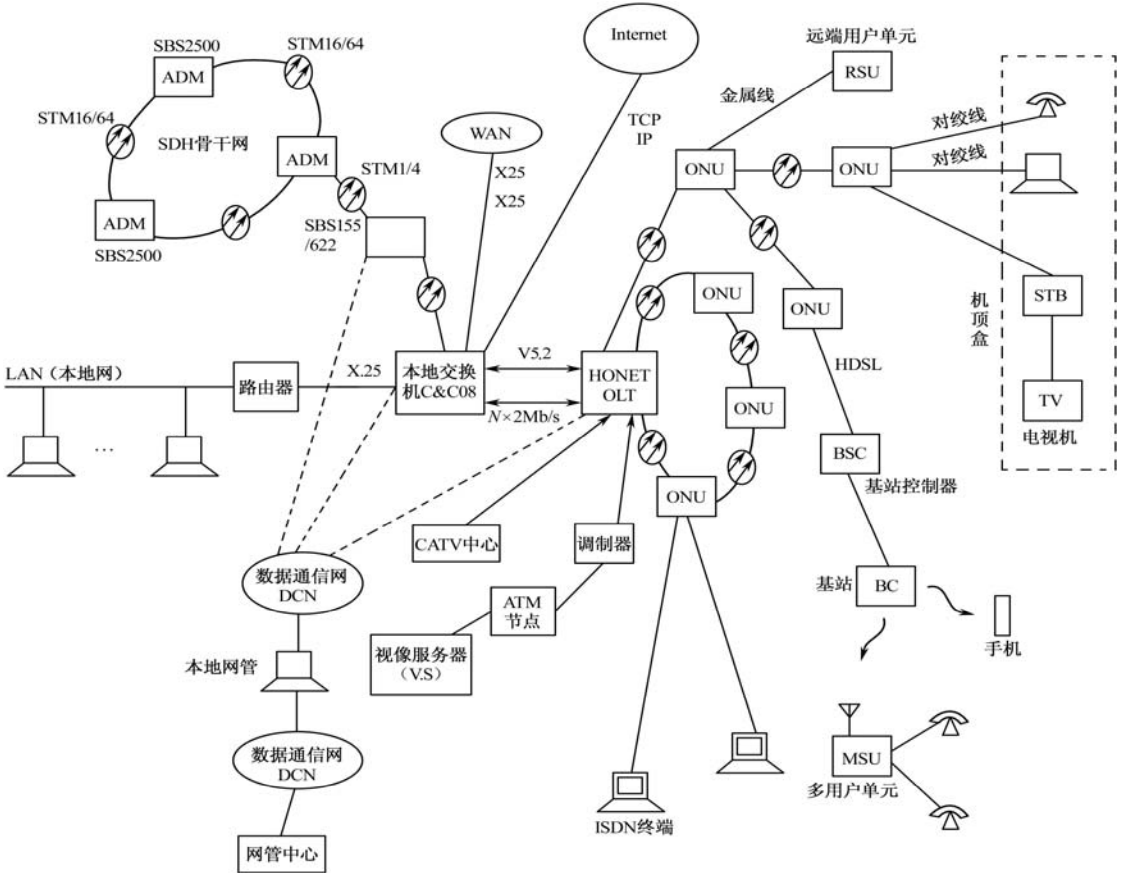


图7-22 HONET综合业务接入网

图中的 SDH 环状骨干网传输的是 STM-16 速率（或 STM-64 速率），其 ADM 用来将骨干网上相应的信息，送给本地交换机（C&C08），本地交换机利用 V.5.2 接口与 HONET 的 OLT 相连；OLT 与 3 个 ONU 组成环状网，从环网中的一个 ONU 用双绞线与 ISDN 终端相连，OLT 中另一个光纤用户单元（SU）与主干 ONU 相连，由此主干 ONU 分成两个支路，一个支路连接一个分支 ONU，再从分支 ONU 连接到用户的话机、计算机、用同轴电缆通过机顶盒连接到电视机，为用户提供 CATV 广播电视和图像业务。主干 ONU 的另一个支路连接到另一个分支 ONU，再由此分支 ONU 利用双绞线以 HDSL 方式连接到无线基站控制器（BSC），再以 2B+D 方式接至无线基站，实现无线接入方式。另外 CATV 中心的视频信号以同轴电缆接入 OLT，来自图像服务器的数字图像信号经 ATM 节点交换并经调制后，以

同轴电缆接到 OLT 上。

ONU 是 HONET 的用户侧接口，根据 HONET 提供的业务，配置相应的端口。

下面讨论一个 HONET 接入网应用实例。某县综合业务接入网采用深圳市华为技术有限公司的 HONET 接入网系统，如图 7-23 所示。

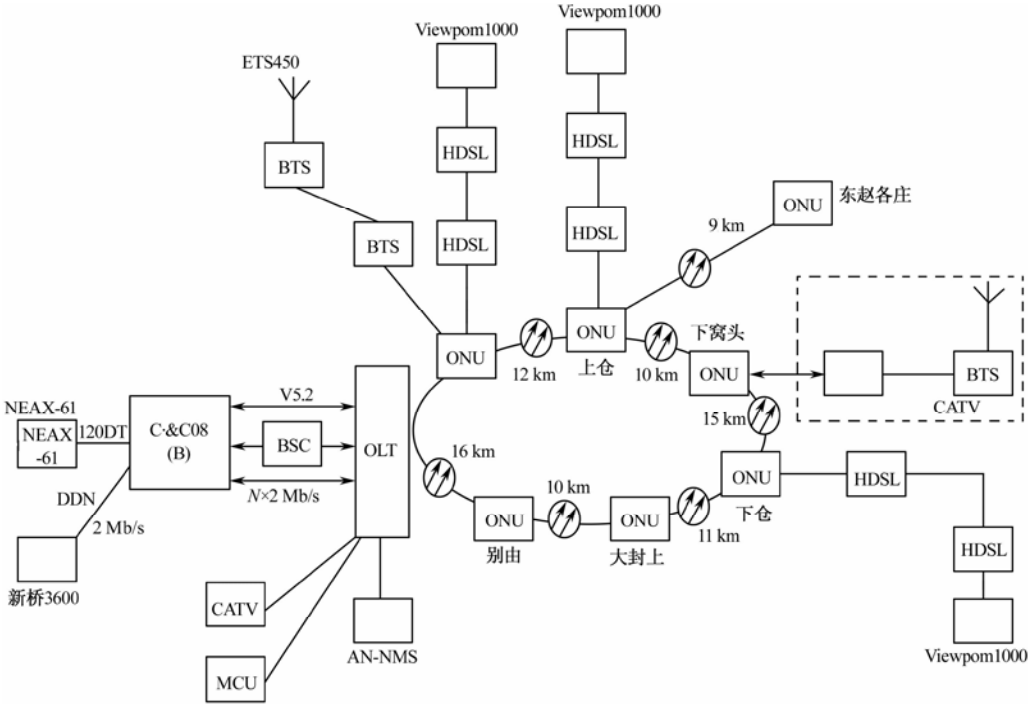


图 7-23 某县光纤接入网组网

接入网根据该县的具体情况：有城市也有广大的农村地区，有山地、丘陵、平原和水库，也就是说所在区域的人口密度变化大，地形复杂，所以接入网的组网采用光纤、有线和无线混合的接入方式，网络拓扑采用环带连的结构，从而设计出其具体结构见图 7-23。由图中可看出，这次组网是根据该县县城周围 6 个乡的位置特点，由 5 个乡与县城组成环状网，边远的一个乡（东赵各庄）由环上的一个乡（上仓）环状带链状结构分叉出去，接到县环网上，无线接入系统（ETS）通过接口接到 HOENT 系统上，除可提供移动终端外，还可以提供固定的单用户终端和多用户终端，以满足不同用户的需要。在县城和两个乡（上仓和下仓）开通了会议电视，并可以同上级的会议电视网相连，可根据以后的发展增加会议电视的网点和数量，这样全网不但解决了县周边乡镇的各项业务接入问题，而且为将来的发展打下了基础。

光纤接入网提供的业务主要有：N-ISDN，会议电视，有线电视，无线本地网络接入。采用开放的 V5.2 接口方式，对电信网的发展有深远的意义。

习 题

1. 简述接入网在通信网中的位置和作用。
2. 画出接入网分层模型，并简述各层的功能。
3. 简述光纤接入网中 OLT，ODN 和 ONU 各部分的作用。
4. 简述实用的 OLT 和 ONU 基本组成及其各部分的作用。
5. 简述光纤接入网的几种拓扑结构，说明各有何特点。
6. 说明 EPON 工作过程，并画出其帧结构。
7. 请分析 APON, GPON, EPON 接入技术特点及区别。

第 8 章 高速光纤计算机网

计算机网络的分类有许多种方法，通常最流行的分类方法是按网络规模或作用范围进行分类，按此方法可将计算机网络分为：局域网，其可覆盖范围为一幢楼或一个园区；城域网，其可覆盖范围为一个地区或城市；广域网，其可覆盖范围为一个省、一个国家或全世界。目前，在学校、企业、银行、军事或政府部门等各种组织中，局域网在信息分发、数据共享和办公室工作方面已扮演了核心的角色。随着局域网软、硬件价格不断降低，局域网变得更多、也更大，它们在各机构的工作中发挥着越来越重要的作用。一旦建立了局域网，它的方便性立刻会使之变得和电话一样重要，不可或缺。在人们对局域网的依赖性日益增强的同时，对其要求也不断提高，如要求越来越高的传输速度，利用光纤传输能力强的特点，实现高速局域网是顺理成章的，本章主要对高速光纤局域网进行讨论。

8.1 光纤局域网概述

20 世纪 70 年代以来，由于大规模集成电路和超大规模集成电路的发展，计算机硬件的功能大大增强，成本不断降低，促使多数中国家庭拥有了个人计算机，许多企事业单位、事业单位的日常运作和管理则更加依赖于计算机。而计算机性能和容量的不断提升，使许多具有高度复杂性和需要强大处理能力的应用得到了空前的发展。例如，需要基于微处理器系统强大处理能力的桌面应用系统有：图像处理器、语音识别系统、视频会议系统、多媒体制作、文件的声像注释等。此外，日益强大的服务器也使企业的事务处理和数据库操作变得越来越方便、快捷。但微型计算机的处理能力和容量必然有限，因此出现了在学校、工厂、办公大楼、控制中心等较小范围内进行计算机之间的连接，以便于共享计算机资源，形成了计算机网络发展的新领域，这就是局域网。

光纤 LAN 是将分散，在小于 10 km 有限地理范围内（如一栋大楼、一个园区或一所学校）的多计算机通过传输媒质光纤连接起来，每台计算机都能随机地通过网络向另一计算机发送数据信息，实现计算机之间的相互通信和共享资源。目前局域网的功能非常强大，很容易进入广域网的范围。常见的局域网数据传输方式有：以太网(Ethernet)、令牌环路网(Token-Ring)、光纤分布式数据接口(Fiber Distributed Data Interface, FDDI)、异步传输模式(ATM)等，其中应用最广泛的当属以太网。这种网络的工作速率为 10 Mb/s、100 Mb/s、1000 Mb/s，采用 IEEE802 系列协议。

美国电气和电子工程协会(IEEE)于 1980 年 2 月成立局域网标准化委员会（简称 802 委员会）专门对局域网的标准进行研究，并提出了 LAN 的定义。

简言之，LAN 是允许中等地域内的众多独立设备通过中等速率的物理信道直接相连的数据通信系统，它是一种通信网，仅有开放系统参考模型的最低 2 层，其覆盖的地域约 10 m~10 km 或更大些。

8.1.1 光纤局域网特点

在个人计算机性能大大提升和网络需求的推动下,计算机局域网技术得到了飞速发展。网络数据传输速率已从最初的1~2 Mb/s,到10 Mb/s,现在已发展到100 Mb/s以上,甚至达到了2 Gb/s,局域网所使用的传输技术也从电缆传输变为了光纤传输。因此,很有必要对采用光纤作为传输介质的局域网进行了解。光纤局域网有如下一些特点。

(1) 频带更宽,传输范围较大。光纤局域网可为一个单位所拥有,通常为一座大楼或一组楼群。网络覆盖范围可达25 km以内。传输速率一般在1~1000 Mb/s,甚至更高,传输误码率较低,一般低于 10^{-9} 。而同轴电缆,最大传输距离只有一公里,数据传输速度最多达到几百 Mb/s,双绞线最大传输距离只有百米左右。贝尔实验室曾成功地做过一个试验,在68 km传输距离,不使用中继器,可以达到8 Gb/s的传输速率,误码率仅为 3×10^{-9} 。

(2) 由于媒质的传输特性高,使得局域网设计时一般不考虑信道利用率的问题,从而节省了相应的软硬件设备,所有的站点共享较高的总带宽。

(3) 由于覆盖范围小,组网设备少,介质访问控制(MAC)方法相对简单,因此出现了一系列专用于LAN的网络协议标准。

(4) 电磁隔离好。数据在光纤中以光信号而非电信号的形式传播,所以系统不会受到外部电磁场、脉冲噪音或串音等影响。

(5) 局域网上的数据信号传输采用广播方式进行,一个站点发出的信号可被网上所有的站点接收,因此,局域网设计时不考虑路由选择问题,甚至可以忽略OSI网络层的存在。

(6) 各站点是平等关系而不是主从关系。

8.1.2 光纤局域网拓扑结构与协议体系结构

1. 光纤局域网拓扑结构和特点

局域网通常的网络拓扑结构有三类:星状网、环状网和总线型网。

图8-1(a)是星状网。这种结构的网络是集中控制,各工作站以星状方式连接起来,网中的每一个节点设备通过连接线与中心节点相连,如果一个工作站需要传输数据,它首先要通过中心节点。由于在这种结构的网络中,中心节点是控制中心,任意两个节点间的通信最多只需两步,所以,传输速度快,网络构形简单、建网容易、便于控制和管理。但这种网络存在可靠性低,共享能力差等缺点,一旦中心节点出现故障则导致全网瘫痪。

图8-1(b)是环状网,最典型的就是令牌环状网,它又称为令牌环路或令牌传递环。环状网的结构也比较简单,网络中各工作站地位相等。通信设备和线路比较节省。在网中信息由固定方向单向流动,两个工作站之间仅有一条通路,无信道选择问题,网络中各工作站都是独立的,如果某个工作站出故障,此工作站就会自动旁路,不影响全网的工作,所以可靠性高。但环网中,响应延时长,而且信息传输效率相对较低。本章将讨论的FDDI就是以光纤为介质的令牌环状网。

图8-1(c)是总线型网。各站直接连在总线上,网络中所有工作站都通过总线进行信

息传输。在总线结构中，作为数据通信必经的总线的负载容量是有限度的，这是由通信媒质本身的物理性能决定的。所以，总线结构网络中工作站的个数是有限制的，如果其数量超出总线负载容量，就需要延长总线的长度，并加入相当数量的附加转接部件，使总线负载达到容量要求。总线结构网络简单可靠、灵活、网络工作站间响应速度快、共享资源能力强、设备投入量少、成本低、安装使用方便，当某个工作站出现故障时，对整个网络系统影响小，因此，总线结构网络是最普遍使用的一种网络。但是由于所有的工作站通信均通过一条公用的总线，所以，实时性较差。

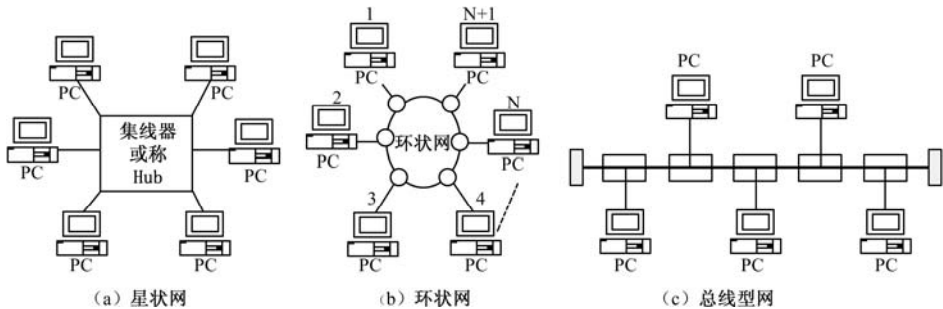


图 8-1 局域网拓扑结构

局域网所使用的传输介质多种多样，有双绞线、同轴电缆和光纤。其中双绞线最便宜，只用于低速（1~2 Mb/s）的基带局域网；现在实用的 10 Mb/s 甚至 100 Mb/s 的局域网可用同轴电缆进行传输，也可用光纤传输，当然光纤在这些传输介质中具有最好的抗电磁干扰特性和最宽的频带。目前光纤主要使用的地方一是环状网，如 FDDI，数据速率可达 100 Mb/s；二是星状网，如吉比特以太网中，其数据速率高达 1 Gb/s，10 Gb/s。

2. 协议体系结构（IEEE802 参考模型）

为了实现相互兼容的局域网之间相互通信和组建局域网的规范化，IEEE 的 802 委员会针对局域网的特点，参照 OSI/RM（如图 8-2 所示）定义了局域网标准，目前许多 802 标准已成为国际标准化组织（ISO）的标准。

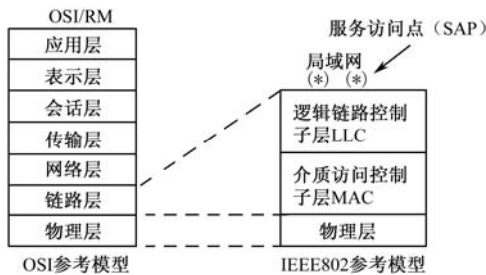


图 8-2 IEEE802 协议层与 OSI 模型对应

局域网的标准主要集中在 OSI/RM 中物理层和数据链路层。由于局域网采用广播式发送信息，一个节点发出的信息可被网中所有节点所接收，不需要路由功能，因此它不需要网络层，而将排序、流量控制等功能归并到数据链路层解决。因局域网是共享信道，

且种类很多，介质访问控制（MAC）方法各不相同，为使局域网中的数据链路层不至于太过复杂，就将局域网的数据链路层分为两个子层：MAC 子层和逻辑链路控制（LLC）子层。网络的服务访问点（SAP）则在 LLC 层与高层的交界面上。

图 8-2 中 MAC 主要功能是把上层传下来的数据封装成帧进行发送（接收时，进行相反的过程），实现和维护 MAC 协议，比特差错检查，寻址。IEEE802.3 定义了 CSMA/CD（载波监听多点接入/碰撞检测）、标记总线、标记环等一系列 MAC 协议功能，其中 CSMA/CD 光纤总线网通常称为“以太网”，是应用最广泛的一种局域网。

LLC 子层主要功能是建立和释放数据链路层的逻辑连接，提供与高层的接口，差错控制，给帧加序号。

物理层的主要功能是信号的编码和译码，进行同步前同步码的产生和释放，比特的传输和接收。每个 IEEE802.x 网络规范都包含了 MAC 和 LLC 的定义。同时 802 参考模型中还包括了对传输介质和拓扑结构的规约，因为传输介质和拓扑结构对于局域网是很重要的，IEEE802 局域网参考体系标准如表 8.1 所示。

表 8.1 IEEE802 局域网标准

IEEE802.1 管理	IEEE802.2 逻辑链路控制（LLC）							
	IEEE802.1 桥接							
	IEEE802.3 CSMA/CD	IEEE802.4 令牌总线	IEEE802.5 令牌环	IEEE802.6 MAN	IEEE802.9 语音、数据	IEEE802.11 无线 LAN	IEEE802.12 请求优先级	IEEE802.14 有线电视数据

8.1.3 光纤局域网的组成及基本设备功能

局域网由网络硬件和网络软件组成，如表 8.2 所示。

表 8.2 局域网的组成

局 域 网	网 络 硬 件	计 算 机	服务器（文件服务器，打印服务器，数据库服务器等）
			工作站（PC，终端机）
		通 信 系 统	网络接口卡 传输线（同轴电缆、双绞线、光纤、微波、卫星） 光电收发器/光电转换器、集线器（Hub）、集中器 网桥、路由器
		外 设	高性能打印机、大容量磁盘等
	网 络 软 件	网 络 系 统 软 件	网络操作系统 实用程序等
		网 络 系 统 应 用 软 件	数据库 字处理 电子邮件 CAD/CAM 等

下面对局域网的基本组成设备进行介绍。

1. 集线器

集线器工作在物理层，它的每个端口都具有发送和接收数据的功能。当集线器的某个端口接收到工作站发来的信号时，就简单地将该信号向所有其他端口转发。若两个端口同时有信号输入（即发生碰撞），那么所有的端口都收不到正确的帧。

集线器多用于中枢或多路交汇点，可以建立一个部门级的网络，并可用于扩展网络和增加节点的数量。集线器在逻辑上是共享总路线结构，一个集线器有许多端口，例如，有 8 端口或 16 端口，每个端口通过 RJ-45 插头用 2 对双绞线与一个工作站上的网卡相连（这种插头可连接 4 对双绞线，实际上只用 2 对，即发送和接收各使用 1 对双绞线），因此一个集线器很像是一个多端口的转发器。图 8-3 是具有 3 端口的集线器与主网连接示意图。

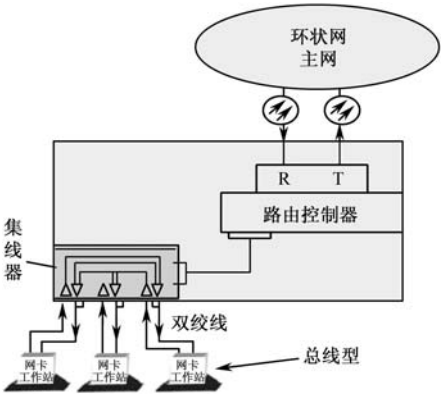


图 8-3 集线器功能图

2. 集中器

集中器可提供若干个从属站接口（即可以再挂站点）M 端口。一般情况下，M 端口可以是光纤接口，也可以是双绞线接口。另外还有 A 和 B 端口，它们属于双连接站点 (DAC) 口。还有 S 端口，它属于单连接站点 (SAC) 口。例如利用 A 和 B 端口，可构成双环状 FDDI 网，利用 M 端口可使节点配置多个从属集线器连接多个子网，构成树状拓扑结构。集中器结构如图 8-4 所示。

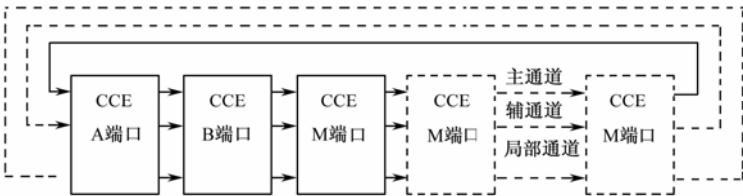


图 8-4 集中器结构

集中器的特点是：每一个端口有一个数据通路开关（CCE），它能连接或旁路每一个端口。当 FDDI 网某节点出现故障时，就由 CCE 完成隔离故障的功能。当 CCE 处于隔离状态

时，环网被认为处于“卷绕”状态。正因为集中器具有该功能，所以在 FDDI 网出现故障时，仍能正常工作，这样就使 FDDI 网络的容错能力提高了。

集中器是一种比较复杂的设备，它有许多部件和选件，此外还可以附加网桥、路由模块，可选择保证系统可靠性的备份电源，管理网络的管理模块等，还有许多与网络传输的相关功能，如子网与干网之间数据不同格式之间的转化，网络上流量的控制、光/电，电/光转换等都可以通过集中器的不同模块来实现。

3. 服务器

网络服务器是为给网络用户提供共享资源和管理共享设备奠定条件，如具有大容量硬盘、激光打印机、共享数据和程序等。一个网络中可以有多个服务器，网络中各用户之间的通信要通过服务器来实现，服务器既可采用专用机器，也可选高档微机。

服务器中最重要的是磁盘系统，因为服务器的磁盘要供网上所有用户共享，如网络操作系统，公用数据库等都存放在服务器的磁盘上，服务器的性能由服务器的 CPU、网络带宽和磁盘等三个因素决定。

4. 工作站

人们常把局域网上的计算机称为“主机”、“工作站”、“站点”或“站”。其实网络中的工作站一般用普通的个人计算机加网络接口来充当。工作站一方面为用户提供本地服务，相当于单机使用；另一方面为用户提供网络服务，如传输数据、共享激光打印机等。

5. 网桥

网桥工作在数据链路层。网桥通常在 OSI 模型中两个节点（两个局域网）的数据链路层间按帧传输信息，如图 8-5 所示。网桥也叫桥接器，是连接各种局域网的一种存储/转发设备，它能将一个较大的 LAN 分割为多个网段，或将两个以上的 LAN 连接为一个逻辑 LAN，使 LAN 上的所有用户都可访问服务器，如图 8-6 所示。网桥的作用是扩展一个分支的传输距离，在网络上增加更多的计算机，降低由于接入过多的计算机而产生的网络数据传输瓶颈，把一个网络分成几个相对独立的网络。连接不同的物理分支，数据包可以在这种混合网络中进行双向的传输。

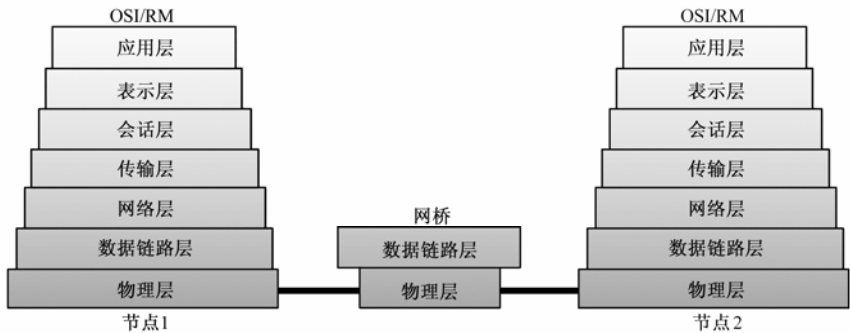


图 8-5 网桥在 OSI/RM 中位置

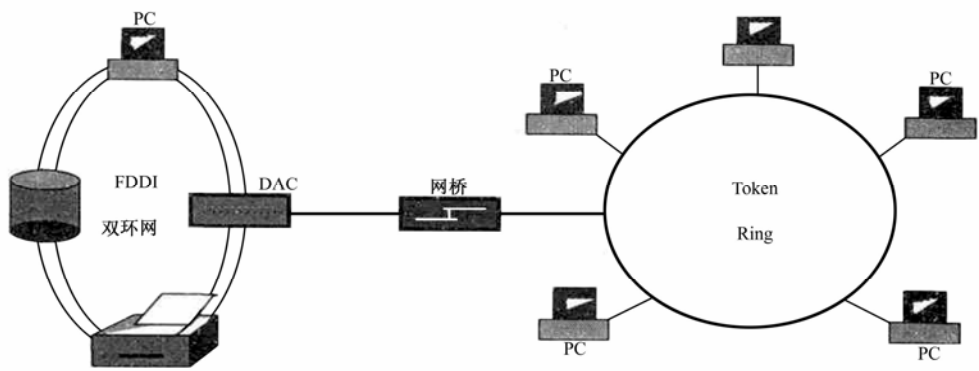


图 8-6 网桥连接 FDDI 和令牌网

6. 路由器

路由器相对网桥而言，提供了更高一个层次的网络互联，路由器运行在网络层上，如图 8-7 所示。路由器除具有网桥功能外，还可在多重路径中选择传输速率较高的路径传递数据信息，是能连接多个独立子网的一种存储/转发设备。

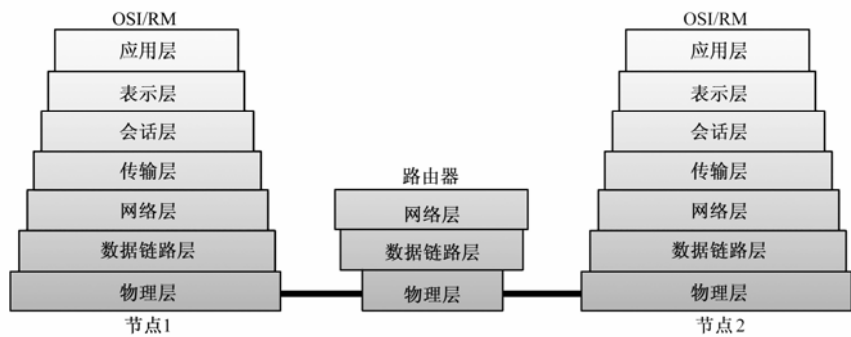


图 8-7 路由器在 OSI/RM 中的位置

由图 8-8 可以看出，路由器在网络中对 LAN A 上的 PC 和 LAN D 上的服务器之间提供路由选择。在 LAN A 上的路由器基于网络的实时状态有三条选择路由，如果直接连接两个 LAN 之间的路由 1 损坏了，则可选择其他两个路由。虽然有些路由不是直接连接两个 LAN，但它具有更宽的频带，更适合于传输大的文件时，路由器也可以选择。

路由器主要有两大功能：一是路由功能，路由器内部设有路径选择表，该表记载相关网络及转发接口等信息，作为路由器在选择路径时的依据。路径选择分为静态路由和动态路由选择，其中动态路径选择，借助路由器相互交换信息过程建立路由表，在使用过程中，任何的新增、修改、路径中断或阻塞等状况都可以反映在路由表上，以便时时保持最新的网络状态及路径信息。二是数据交换与转发功能，即数据在路由器内部移动与处理的过程：从路由器一个接口接收，然后选择合适接口转发，其间做帧的解封装与封装，并对包做相应处理。

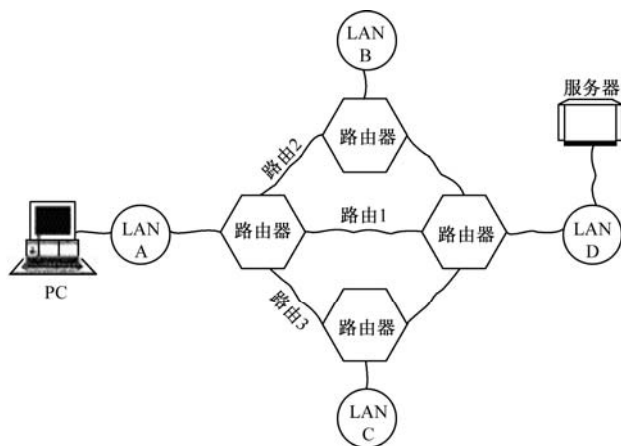


图 8-8 路由器的路由选择图

7. 局域网交换机

局域网根据所使用的网络技术，采用的交换机可分为以太网交换机、令牌环交换机、FDDI 交换机、ATM 交换机和快速以太网交换机。其中最常用的是以太网交换机，用它可提供 FDDI 高速主干连接方案。

以太网交换机，也可以称为交换式集线器，通常有多个端口，每个端口可直接与工作站相连，而且一般都工作在全双工方式。当工作站要进行通信时，交换机能同时连通许多对端口，使每对相互通信的工作站都能像独占通信介质那样，进行无冲突的传输数据，通信完成后就断开连接。以太网交换机工作在数据链路层，因此又称它为第二层交换机，它有帧过滤、存储/转发等功能。

目前，局域网交换技术已经延伸到 OSI 第三层的部分功能，即所谓第三层交换。第三层交换可以不将广播封包扩散，直接利用动态建立的 MAC 地址来通信，似乎可以看懂第三层的信息，如 IP 地址、ARP（地址解析协议）等，具有多路广播和虚拟网间基于 IP，IPX 等协议的路由功能。

8、光电收发器/光电转换器

光电收发器/光电转换器两者之间没有太大的区别，都是为了将光纤介质转换成铜线接入使用。光电收发器是一种专用的光电调制解调器（或光端机），适用局域网中光电信号的转换，而仅仅是信号转换，没有接口协议的转换。光电转换器也是一种专用光电调制解调器，它用于广域网中光电信号的转换和接口协议的转换，是广域网接入设备。不过随着网络技术的发展，光电转换器和光猫的概念越来越模糊，近期两者基本可以统一为同一种设备了，光电转换器也成为光猫的学名。光电转换器也称为单端口光端机，是针对特殊用户环境而设计的产品，它利用一对光纤进行单 E1 或单 V.35 或单 10BaseT 点到点式的光传输终端设备，可作为本地网的中继传输设备，适用于基站的光纤终端传输设备以及租用线路设备。

对于 10 Mb/s 光纤以太网的光纤传输系统设计主要内容有传输光纤、波长选择和光收发器（光发射机和光接收机）。光纤可选多模光纤（几何尺寸 50/125 μm 或 62.5/125 μm ，损耗

系数小于 3 dB/km)、工作波长为 850 nm、带宽 300~400 MHz·km (62.5/125 μm) 到 1000 MHz·km (50/125 μm)，光纤连接器 FC、SC、ST。光收发机要求是：发射功率为-20~-10 dBm，线路编码为 1B2B 码，线路实传速率 20 Mb/s，接收灵敏度<-30 dBm，误码率 $<10^{-9}$ 。

对于 100 Mb/s 光纤以太网的光纤传输系统设计主要内容有传输光纤、波长选择和光收发器。光纤可选单模光纤 G.652（几何尺寸 9/125 μm ，损耗系数<0.35 dB/km）、工作波长为 1310 nm、光纤连接器 FC、SC、ST。光收发机要求是：发射功率为-20~-10 dBm，线路编码为 4B5B 码，线路实传速率 125 Mb/s，接收灵敏度<-30dBm，误码率 $<10^{-9}$ 。

对于 1000 Mb/s 光纤以太网的光纤传输系统设计主要内容有传输光纤、波长选择和光收发器。光纤可选单模光纤 G.652（几何尺寸 9/125 μm ，损耗系数<0.35 dB/km）、工作波长为 1310 nm、光纤连接器 FC、SC、ST。光收发机要求是：发射功率为-3~-11.5 dBm，线路编码为 8B10B 码，线路实传速率 1250 Mb/s，接收平均光功率为-3~-19 dBm，误码率 $<10^{-9}$ 。

8.2 光纤分布式数据接口（FDDI）环网

FDDI 是美国国家标准协会 ANSI 于 1982 年制定的一个使用光纤作为传输媒质的、高速、通用的令牌环状网标准（IEEE802.5 局域网），随后被定为国际标准 ISO9314。FDDI 网络可作为高速局域网，在小范围内连接高速计算机系统，或作为城域网 MAN 连接较小的网络，或作为主干网连接分布在较大范围的工作站。

8.2.1 FDDI的技术特点及网络结构

FDDI 的介质访问控制方式与 IEEE 802.5 十分接近。使用 IEEE 802.2 LLC 协议，与符合 IEEE 802 标准的局域网兼容；数据传输速率为 100 Mb/s，允许接入站点数为 500，环路长度为 100 km，可以使用双环结构，双环总光纤的长度为 200 km；具有容错能力；传输介质可以使用多模或单模光纤或双绞线，具有动态分配带宽的能力，能支持同步和异步数据传输；分组长度最大为 4 500 B。

FDDI 标准中根据网络连接的站点数和覆盖的地理范围不同，描述了 4 种网络结构形式。

（1）后端网络（数据中心环境）：特点是站点数相对较少（不超 50 个），其中大部分是工作站或高速外设。其基本要求是可靠、高速和容错，因此大部分站是双连接站点。相邻节点之间光纤长度不超过 400 m，而环的总长不超过 20 km。

（2）前端网络（或办公室、建筑物环境）：特点是具有大量的非容错单连接站点，使用星状布线方案。在此环境中，小型计算机、通信集中器、工作站、PC 和外部设备经过集中器连接到 FDDI 网络。

（3）主干网（或校园环境）：特点是站点分布在多个建筑物中，其中可能有距离长达 2km 的点ToPoint链路。

（4）多区域网：其特点是站点群分布在不同的场地，各场地间的距离可能达 60 km 或更大。多区域网环境往往需要跨越不同的公司或机构，这也表明 FDDI 可用作城域网。用典型的 FDDI 做主干网连接多个局域网的结构如图 8-9 所示。

FDDI 是为传输数据而设计的高速分组交换局域网，不支持多媒体应用。为了解决多媒

体在 FDDI 上的应用问题，1991 年 ANSI 制定了 FDDI-II 标准。FDDI-II 不仅能够支持原有的分组交换服务，还能够提供等时的电路交换服务，包括提供话音、静止图像、活动图像等信息传输。

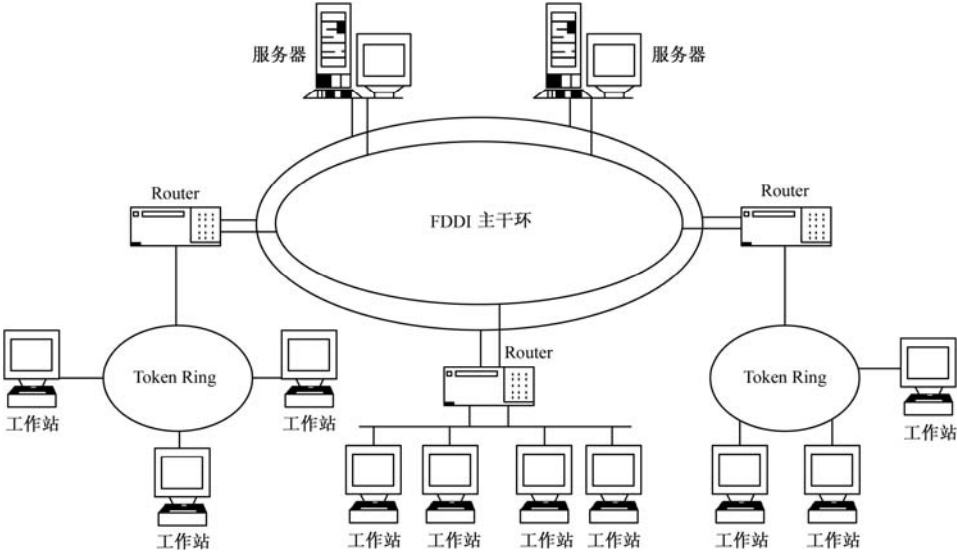


图 8-9 FDDI 的主干网连接多个局域网结构图

8.2.2 FDDI双环自愈网

网络采用了双环自愈技术，大大提高了网络的可靠性，图 8-9 给出了具有双环自愈功能的 FDDI 网，其自愈功能是使用两个数据传输方向相反的环路，分别称主用环（图中设为外环，顺时针方向传输）和备用环（内环，反时针方向传输）。在正常情况下，只有一个主用环在工作（如图 8-10（a）所示），此时备用环不工作。当环路出现故障时，无论是链路故障（如图 8-10（b）所示）；还是站点故障（如图 8-10（c）所示），FDDI 均可自动重新配置，通过站点自动光旁路开关，自动将主环光信号旁路倒换到备用环，同时启动备用环工作，确保网络继续运行。图中方框代表一个站点，小黑方点代表 MAC 实体逻辑连接。

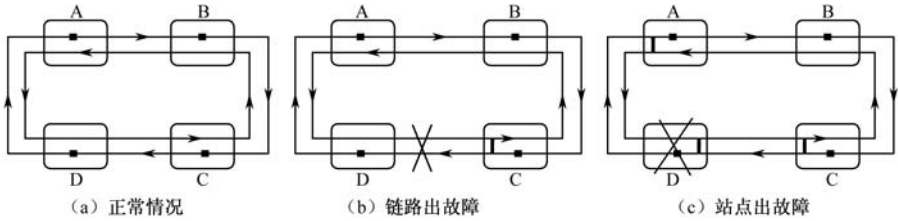


图 8-10 FDDI 双环自愈网

不难看出，在环路出现故障时，主用环和备用环都工作，FDDI 环路的总长度增大约一倍，一个站点由于要支持两个环，环路的吞吐量自然要下降。当出现多处故障时，FDDI 将变为多个分离的小环状网继续工作。

8.2.3 FDDI技术在校园主干网的应用

教育和科研计算机网络是国家教育和科研事业的重要基础设施。在世界范围的计算机网络中，教育和科研网络是最主要的组成部分之一。各发达国家的大专院校和科研院所一般都建有相当规模的校园网。校园网可以为学校师生和科研人员创造最先进的网络计算环境，并为它们提供计算机辅助教学、科学计算、资源共享和信息交流等全方位的服务。

与一般的计算机网络应用相比，校园网有很多特点：网络规模大，网络节点一般都有几百或数千个；应用环境多，因专业不同需要提供不同类型的服务；物理位置分散，各子网分布在校园各教学楼内；网络设备复杂，没有系统性，组网难度较大；子网分割较多，应用相对独立；主干网覆盖范围大，带宽要求较高；系统开放性强，能够不断吸收新的技术；需要提供远程通信能力，能连接公共数字网或因特网。

校园网的结构通常采用主干网与功能子网互联的层次网络结构。而校园网主干网通常采用 FDDI 组网技术，由子网分布的物理位置通过一对光纤将它们串接起来，构成一个封闭的环路，这就是典型的 FDDI 双环网结构，子网与 FDDI 双环网之间由网桥或路由器实现互联，子网的结构一般没有太多的限制，相邻的子网可以根据实际情况连接到同一个网桥或路由器上（使用多端口网桥或路由器）。校园网一般还设有集中管理的数据中心（如计算中心、信息中心等），有许多共享设备，如大型主机、服务器、多媒体设备和一些昂贵的外部设备，等等。它们通过集中器连接到主干网，主干网则要能够提供高速传输通道，并能兼容各种规格的子网结构及其网络协议。网络管理工作站通常也设在数据中心。校园网与外界的接口，如远程路由器或网关等也需集中管理。图 8-11 所示为 FDDI 双环结构的校园主干网。

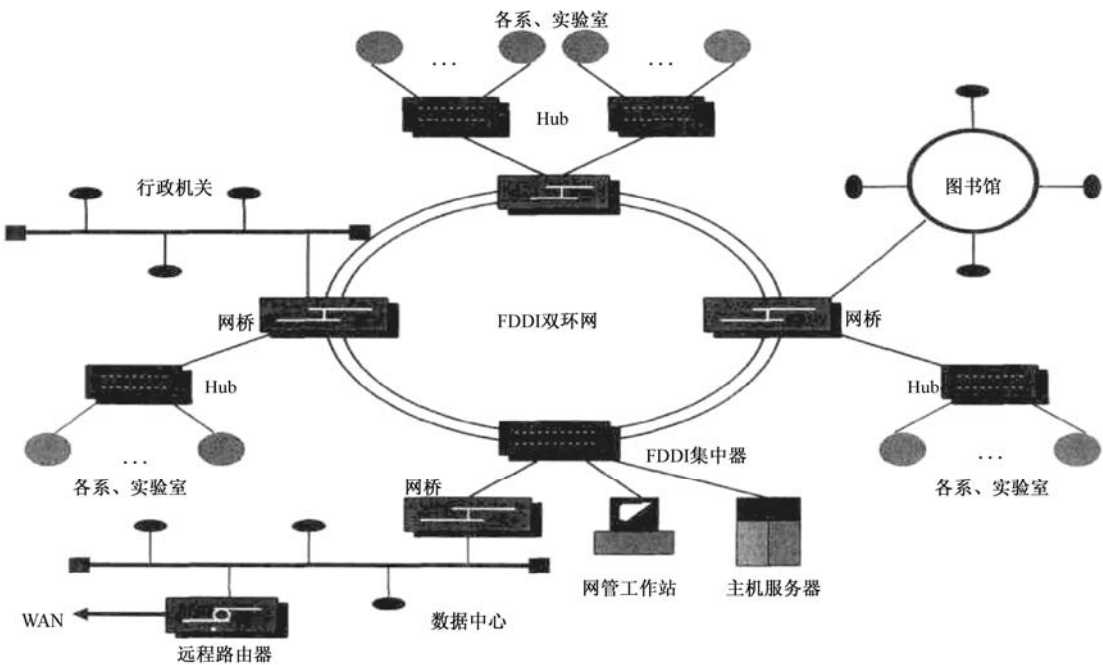


图 8-11 FDDI 双环自愈结构的校园网

8.3 高速光纤以太网

以太网是当今最流行的一种局域网。本节中的高速光纤以太网是指速率为 100Mb/s 的快速以太网、速率为 1 000Mb/s 以太网，甚至是 10Gb/s 以太网，主要以光纤为传输介质。

8.3.1 100 Mb/s 光纤以太网

快速以太网采用光纤作为传输介质时使用物理层协议为 100Base-FX, 100Base-SX, 它们继承性地直接拓展了 10 Mb/s 以太网，原封不动地采用了 IEEE802.3 标准的 CSMA/CD 介质访问控制技术，采用集线器组网构成星状拓扑结构，将网络传输的线速率提高到 100 Mb/s，提供了从 10Base-FL 平滑过渡到 100 Mb/s 性能的解决方案。

100Base-FX 协议规定使用 1310 nm 光波长, 100Base-SX 协议规定使用 850 nm 光波长, 这两个协议都是使用 1 对单模光纤, 其中一根用于发送, 另一根用于接收, 传输距离为 20 km。若使用多模光纤, 传输距离只有 2 km。

8.3.2 1 000 Mb/s 光纤以太网

1996 年, 千兆比特以太网问世, 1999 年 IEEE 发表了 1000Base-X 标准 802.3Z, 引起业界的广泛兴趣。千兆比特以太网 (1 000 Mb/s) 和以太网 (10 Mb/s, 100 Mb/s) 具有相同的帧格式、流量控制和全双工方式。

图 8-12 表示了一个典型的千兆比特以太网的配置实例。一台 1Gb/s 局域网交换机可以直接与多个图形工作站相连。也可以作百兆比特以太网的主干网, 也可以与中央服务器和高速工作组交换机 (100 Mb/s, 1 000 Mb/s 以太网交换机或集线器) 连接。

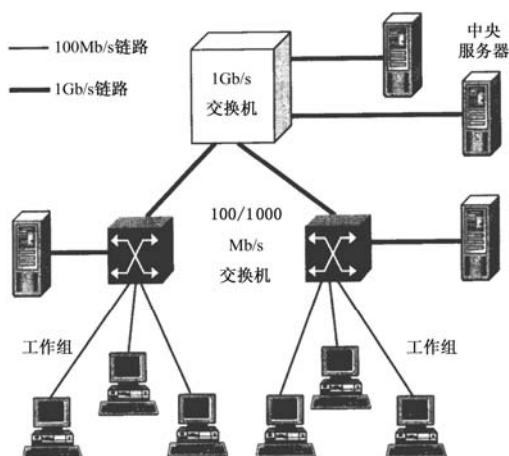


图 8-12 千兆比特以太网配置示意图

IEEE 为千兆比特以太网制定了如下物理层协议:

1) 1000Base-SX

1000Base-SX 使用 850 nm 激光器，采用芯径为 62.5 μm 和 50 μm 的多模光纤，最大传输距离分别为 300 m 和 550 m。1000Base-SX 适于作为建筑物内部构建宽带主干网，智能大厦主干网、企业内部主干网等。

2) 1000Base-LX

1000Base-LX 使用 1300 nm 激光器，采用多模光纤，最大传输距离为 550 m；采用单模光纤，传输距离为 5 km，因此单模光纤已成为远距离公用网的传输介质。1000Base-LX 特别适于作为校园主干网；采用吉比特光收发器，1000Base-LX 也适于作为城域主干网。

3) 1000Base-CX

1000Base-CX 采用屏蔽双绞线，传输速率为 1.25 Gb/s，传输距离为 25 m。

8.3.3 10 Gb/s 光纤以太网

以太网在局域网的发展中占有统治地位，独领风骚。在 1999 年 3 月 IEEE802.3 成立了高速研究组，其任务致力于 10 Gb/s 以太网的研究。10 Gb/s 以太网的标准制定是由 IEEE802.3ae 任务组承担的，其特点是：10 Gb/s 以太网只使用光纤作为传输介质，采用 8B10B 线路编码，4 个波长的 DWDM 技术，实传速率为 12.5Gb/s。若用单模光纤及增强型接收器，传输距离可超过 40 km，适宜于 MAN 或 WAN 的应用范围。

8.4 光互联网简介

因特网是目前国际上规模最大的计算机网络，世界上任何一个地方的因特网用户都可从因特网中获取所需的信息，如自然、社会、历史、科技、教育、卫生、医疗、娱乐、政治、经济、文化、金融、商业、军事、环境和地理等，因特网可谓全球最大的信息库和最大的图书馆。

因特网 Web 业务和用户数量的爆炸性增长，对带宽的需求正急剧增长，PDH/SDH 传输网络已难以满足未来因特网发展的需要。为此，很多网络公司和研究机构正在积极开发全光网络技术的产品，其中，DWDM 和光互联网络最具代表性。

8.4.1 光互联网的概念

光互联网络实际是一种以光纤为物理介质的新一代 IP 数据网络，其底层采用光传输网作为物理传输网络。传统数据网络中的主要设备是 ATM 交换机、路由器等；而在光传输网络中，其主要设备是 DWDM 设备、光放大器和光纤等。

光互联网是以宽带光网络为平台，由高性能分组交换机、路由器实现连接的数据通信网，其分层模型如图 8-13 所示，它包括数据网络层，光网络层以及层间适配和管理功能。

数据网络层提供数据的传输和处理。数据网络层的组成设备主要是 ATM 交换机、路由器等。

光网络层负责提供通道，光纤网络层的组成设备主要有 DWDM 终端、光放大器、光纤（G.652，G.653，G.655）等。

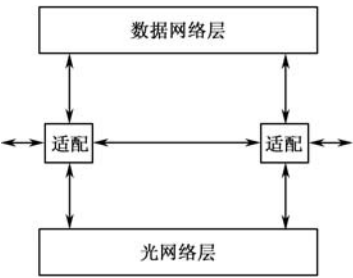


图 8-13 光互联网分层模型

层间适配和管理功能用于适配数据网络和光纤网络，使它们相互独立。
在光互联网中高性能的节点（如交换机、路由器）可直接连接到光纤上，也可连接在向各类客户（如 ATM，SDH 设备、路由器）提供光波长路由的光网络层。数据网络层采用 IP 已是不争的事实，物理层采用 DWDM 的全光传输网（OTN）也无可争议。中间适配层（数据链路层）究竟如何实现还在讨论中。光互联网论坛推荐的光互联网多协议栈及功能分层模型，如图 8-14 所示。考虑到 ATM，SDH 技术上的兼容性，在 DWDM 全光网上传输数据为主的 IP 业务有以下 4 种适配方案。

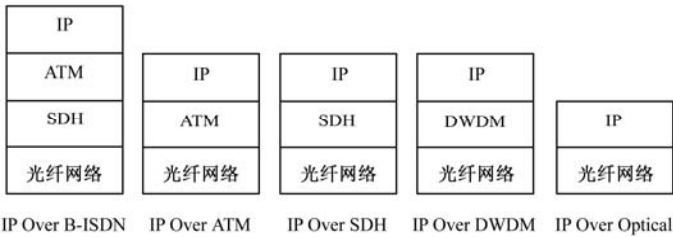


图 8-14 光互联网协议栈

1. IP Over ATM

使用 ATM 技术来承载 IP，这是目前国内外许多传统电信公司采用的方法。这种方法的优点是可综合利用 ATM 速度快、容量大和支撑多业务的能力。缺点是由于 ATM 信元仅为 53 B，需要来回转换 IP 包，因此效率较低。

IP 与 ATM 技术相结合的难点在于，ATM 是面向连接的技术，而 IP 是面向非连接的技术。IP 协议有自己的寻址方式和相应的选路功能，而 ATM 技术也存在相应的信令、选路规程和地址结构。从 IP 协议与 ATM 协议的关系划分看，IP 与 ATM 相结合的技术存在两种模型，即重叠模型和集成模型。

近来，多协议标记交换（Multi-Protocol Label Switching, MPLS）越来越引起人们的关注，大家普遍看好的 MPLS 将作为 ATM 与 IP 相结合技术的一种解决方案而应用于广域网。MPLS 属于集成模型，它基于标记交换机制，在 ATM 层上直接承载 IP 业务，与重叠模型相比，提高了业务的性能和网络的效率。当 ATM 网络设备引入 MPLS 功能后，将同时支持 IP

业务和其他 ATM 业务。

2. IP Over SDH

IP Over SDH 技术以 SDH 网络作为 IP 数据网络的物理传输网络，它使用链路协议及点到点协议 PPP 对 IP 数据包进行封装，把 IP 数据包按规范插入 PPP 帧中的信息段，然后再映射到 SDH 帧上，最后到达光层，在光纤中传输。IP Over SDH 方式的主要优点是网络体系结构简单，传输效率高，技术较为成熟。

3. IP Over Optical

如果说 IP Over ATM 和 IP Over SDH 是为充分发掘现有的 ATM 网络和 SDH 网络潜力的话，那么，IP Over Optical 则好像完全是在一张白纸上描绘最新最美的蓝图。IP Over Optical 在光纤上直接传输 IP 业务，是一种经济有效的方法，由于吉比特以太网技术的广泛应用，这种方法越来越被人们所接受和采用。

IP Over Optical 应用结构如图 8-15 所示，高速主干网路由器之间通过 OADM 系统和 DWDM 终端复用器相连，OADM 允许不同光网络的不同波长信号在不同的地点分叉复用，将越来越多的实时业务，如话音业务，也将在 IP 网络中传输；QoS 和快速恢复将成为未来 IP 网络的核心问题，随着光网络中复用设备和交叉连接设备的发展和应用，实现在光层的短时间内恢复将成为可能，IP 路由器可以集中处理服务质量和多业务等问题，在 IP Over SDH 中这些问题是很难实现的。

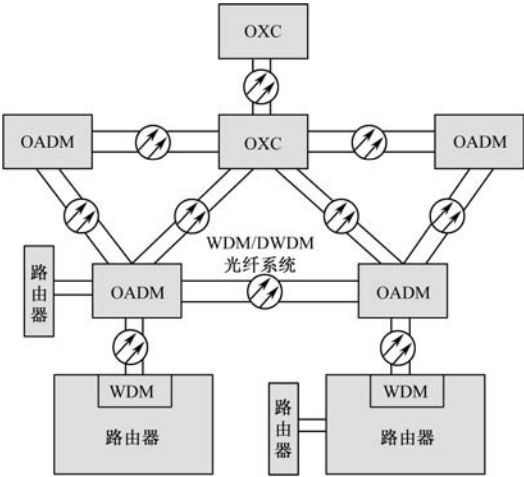


图 8-15 IP over Optical 应用结构

4. IP Over DWDM

IP Over DWDM 是目前最有发展前途的宽带 IP 网络技术，采用密集波分复用技术 DWDM 能极大地提高网络的带宽。许多专家认为 IP Over DWDM 代表了未来信息高速公路的发展方向，又与万兆比特以大网相结合，将会对现有的网络技术产生难以估量的冲击。仅当所有端到端业务都由光纤网络提供时，IP Over DWDM 才能实现。

8.4.2 光互联网的体系结构

OIF 描绘了光互联网的体系结构，如图 8-16 所示。图中 OADM 或 OXC 构成的环网（DWDM 环网）表示全光网（OTN）为核心网；ADM 环网表示 SDH 光传输网为次核心网，次核心网由 ADM 或 DXC，太位路由器、吉位路由器、ATM 交换机组成，ATM 交换机可以直接或通过光纤和 SDH 环、OTN 环相连。DWDM 光网络和 SDH 光同步网络前面已作了介绍，这里就不再介绍。

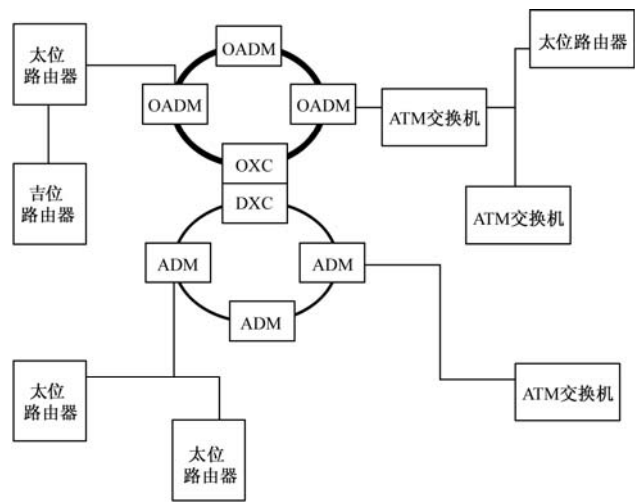


图 8-16 光互联网的结构

习 题

1. 计算机网络按规模分类有哪些？
2. 简述 FDDI 双环自愈网工作原理。
3. 简述网桥与路由器功能上的区别。
4. 简述局域网的主要特点。
5. 设计一个局域网，所需的基本硬件设备有哪些？

第 9 章 全光通信网

9.1 全光通信网概述

随着 Internet 业务和多媒体应用的快速发展，网络的业务量正在以指数级的速度迅速膨胀，这就要求网络整体资源能力（即传输能力、处理能力和存储能力）的增强，如图 9-1 所示。光纤通信技术出现以后，光技术开始渗透于整个通信网，光纤通信有向全光网推进的趋势。



图 9-1 网络整体资源能力

全光通信的概念是 20 世纪 90 年代提出的，是为了解决电子瓶颈限制交换和信息处理速率的问题。全光通信网是光纤通信技术发展的最高阶段，其本意是信号以光的形式穿过整个网络，直接在光域进行信号的传输、再生、交换（选路），中间不经过任何光电转换，以达到全光透明性，具有高度生存性，宽带通信网的理想目标。

9.1.1 全光通信网的基本概念

全光通信网也简称全光网。全光网是指网中端到端用户节点之间的信号传输与交换全部保持着光的形式，即端到端的全光路，中间没有光/电转换器。数据从源节点到目的节点的传输过程都在光域内进行，而其在各网络节点的交换则使用高可靠、大容量和高度灵活的光交叉连接设备（OXC）。这样，网内光信号的流动没有用光电转换的障碍，信息传递过程无需面对电子器件处理信息速率难以提高的困难。另外，由于没有电的处理，故允许存在各种不同的协议和编码形式，使信号传输具有透明性。与电方式相比，减少了转换设备的开销，也使整个网络的管理趋于简化。

全光网的两大组成部分是传输和节点，网络传输及节点技术的演进过程，如图 9-2 所示。传输部分已大量采用大容量光纤。节点部分，对于绝大多数情况来说，光信号只是经过这个节点，不需要进行光/电转换，而传统的网络传输信息在网络节点处要经过 O/E/O 的多次转换，因而传输速度慢、损耗大，传输的信息量少，有的图像信息则显得不够清晰。采用全光交换不但可以不受光源、检测器等器件响应速度的限制，消除光/电转换中的“电

子瓶颈”，大大提高交换单元的吞吐量，还可以省去很多节点处的电子交换设备，降低节点上的成本。全光网的演进过程，如图 9-3 所示，图中 OLS 为光标记交换技术，Client 为客户端。目前实际全光网仅在于子网内部，子网之间连接仍采用光/电转换过程来完成整个通信网组成。

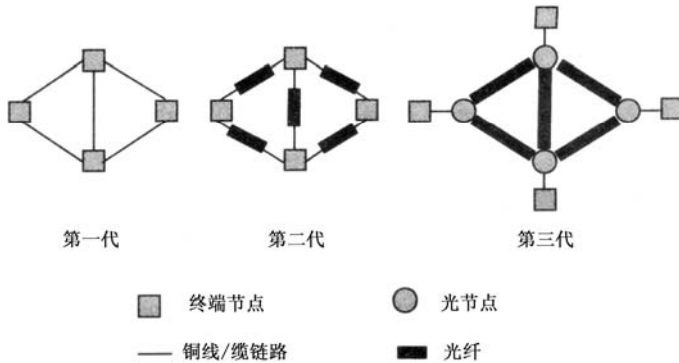


图 9-2 网络传输及节点技术的演进

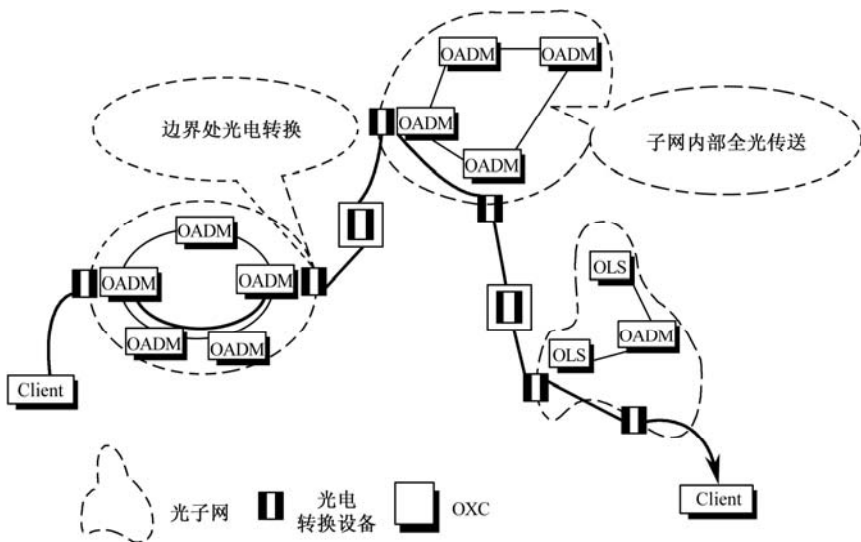


图 9-3 全光网的演进

9.1.2 全光通信网的结构

目前大多数全光网络是以 DWDM 为基础的全光传送网，即在点到点光纤传输系统中，全程不需要任何光/电转换，涉及全光中继、光的上下复用技术和波分等关键技术。而未来全光网络一定是全光网加 IP 业务网的格局，完成用户全程的光传送、交换和处理，涉及全光交换、光交叉连接、光插分复用、波长转换以及信道争夺和同步等关键技术。全光网基本结构可以分为光网络层和电网络层。光网络层（光链路相连的部分）采用了 DWDM 技术，可在一个光网络中传输几个波长的光信号。并在网络节点之间采用 OXC，通过对光信号进

行交叉连接，能够灵活有效地管理光纤传输网络。光网络层通过光链路和宽带网络用户接口与 LAN 相连。电网络层中的 ADM 用于把高速 STM- N 光信号直接分解成各种 PDH 支路信号，或作为 STM-1 信号的复用器。DXC 用于对各种端口速率（PDH 或 SDH）进行可控的连接和再连接。

利用 DWDM 技术的全光网将采用 3 级体系结构。0 级（最低一级）是众多单位各自拥有的 LAN，它们各自连接若干用户的光终端（OT）。每个 0 级网的内部使用一套波长，但各个 0 级网多数也可重复使用同一套波长。1 级网可看作许多 MAN，它们各自设置波长路由器连接若干个 0 级网。2 级网可以看作全国或国际的主干网，它们利用波长转换器或交换机连接所有的 1 级网。

9.1.3 全光通信网的特点

全光网络利用光波长组网，相对于传统的电信网而言，它是基于 DWDM 技术在光域完成信号的选择路由和交换等功能，具有如下特点：

（1）WDM 全光网采用密集波分复用技术，可以充分利用光纤巨大的带宽资源，有极大的传输容量和传输质量，且与现有的通信网有良好的兼容性。

（2）全光网结构简单，端到端采用透明光通路连接，沿途没有光/电转换与存储，网中许多光器件都是无源的，便于维护，可靠性高。

（3）全光网结构具备可扩充性和可重构性。网络中使用了 OXC，加入新的网络节点时，不影响原有的网络结构和设备，从而可降低成本。当用户通信量增加或网络出现故障时，可以改变 OXC 的连接方式，对网络进行可靠重构。

（4）全光网以波长选择路由，各个连接是通过承载信息的波长来识别的，因此对传输码率、数据格式及调制方式均具有透明性，可提供不同的速率、协议、调制频率和制式的信号同时兼容，并允许几代设备（PDH/SDH/ATM）甚至 IP 技术共存，共同使用光缆基础设施。

（5）全光网技术的优点具有自动修复功能。

全光网主要由核心网、城域网和接入网三者组成，三者的基本结构类似，由 DWDM 系统、光放大器、OADM 和 OXC 等设备组成。

9.1.4 全光通信网的相关技术

全光网是采用光波技术的先进网络，全光网的相关技术包括光传输技术、光交换技术、光交叉连接技术、全光中继技术、光分插复用技术、控制和管理技术、自动交换光网络（Automatic Switched Optical Network, ASON）等。

1. 光交换技术

随着光波分复用系统的应用，每秒总量达几百上千兆甚至太比特（Tb/s）的数字信息要由交换来处理，由于众所周知的电子瓶颈限制问题，引入了光子技术，实现光交换。光交换技术，在光交换节点不经过 O/E/O 转换，不受检测器、调制器等光电器件响应速度的限

制,对比特率和调制方式透明,可实现宽带的信号交换。

2. 光交叉连接技术

光交叉连接(OXC)是用于光纤网络节点的设备,通过对光信号进行交叉连接,能够灵活有效地管理光纤传输网络,是实现可靠的网络保护/恢复以及自动配线和监控的重要手段。

OXC 有空分、时分和波分三种类型,目前比较成熟的技术是波分复用和空分技术,时分技术还不成熟。如果将波分复用技术和空分技术相结合,可大大提高光交叉连接矩阵的容量和灵活性。它是全光网络的核心。OXC 交换的是全光信号,它在网络节点处,对指定波长进行连接,从而有效地利用波长资源,实现波长重用。当光纤中断或业务失效时,OXC 能够自动完成故障隔离、重新选择路由和网络重新配置等操作,使业务不中断,即它具有高速光信号的路由选择、网络恢复等功能。OXC 除了提供光路由选择外,还允许光信号插入或分离出电网络层,它好像 SDH 中的 DXC。这部分内容参见 6.2 节的介绍。

3. 全光中继技术

传统的光纤传输系统是采用光/电/光再生中继器,这种方式的中继设备十分复杂,影响系统的稳定性和可靠性。现已开发 SOA 和光纤放大器有 EDFA, PDFA, NDFA。EDFA 是目前光放大技术的主流,应用在 1 550 nm 波段,它可以对波长在 1 530~1 570 nm 的光信号同时放大,增益可达 30~40 dB,它能简化系统,降低传输成本,增加中继距离,提高光信号传输的透明性,是实现全光网的关键器件。这部分内容参见 3.3 节的介绍。

4. 光分插复用技术

OADM 具有选择性,可以从传输设备中选择下路信号或上路信号,也可仅通过某个波长信号,但不影响其他波长信道的传输。OADM 在光域内实现了 SDH 中的 ADM 在时域内完成的功能,且具有透明性,可以处理任何格式和速率的信号,能提高网络的可靠性,降低节点成本。提高网络运行效率,是组建全光网必不可少的关键性设备。这部分内容参见 6.2 节的介绍。

5. 控制和管理技术

全光网对管理和控制提出了新的问题。一是现行的传输系统(SDH)有自定义的表示故障状态监控的协议,这要求网络层必须与传输层一致;二是由于表示网络状况的正常数字信号不能从透明的光网络中取得,所以存在应该使用新的监控方法的问题;三是在透明的全光网中,有可能不同的传输系统共享相同的传输媒质,而每一不同的传输系统会有自己定义的处理故障的方法,这便产生了如何协调处理好不同系统、不同传输层之间关系的问题。对于以上每一种问题都要有相应的处理方案。从现阶段的 WDM 全光网发展来看,网络的控制和管理要比网络的实现技术更具挑战性,网络的配置管理、波长的分配管理、管理控制协议、网络的性能测试等都是网络管理方面需解决的技术。

全光网相关技术中的光交叉连接技术、全光中继技术、光分插复用技术已在前面章节进行了介绍,不再详细叙述,本章重点介绍光交换技术和自动交换光网络。

9.2 光交换技术

光交换技术是指不经过任何光/电转换，在光域直接将输入光信号交换到不同的输出端。光交换系统主要由输入接口、光交换矩阵、输出接口和控制单元四部分组成，如图 9-4 所示。

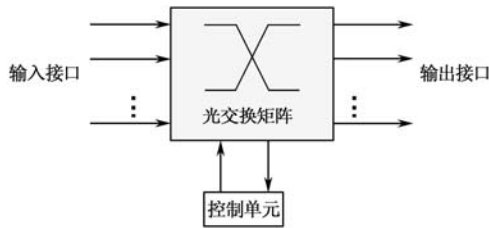


图 9-4 光交换系统组成

由于目前光逻辑器件的功能还较简单，不能完成控制部分复杂的逻辑处理功能，因此国际上现有的光交换控制单元还要由电信号来完成，即所谓的电控光交换。在控制单元的输入端进行光/电转换，而在输出端需完成电/光转换。随着光器件技术的发展，光交换技术的最终发展趋势将是光控光交换。

组成光交换系统的核心器件主要有光开关器件，光缓存器件（光缓存是光分组交换的关键部件），光逻辑器件（该类器件由光信号控制它的状态，用来完成各类布尔逻辑运算），波长转换器等。

目前光网络中的交换技术主要有 3 种：光的电路交换（Optical Circuit Switching,OCS）技术，光的分组交换（Optical Packet Switching, OPS）技术，光的突发交换（Optical Burst Switching, OBS）技术，光标记交换（Optical Label Switch, OLS）技术等。OCS 技术可利用 OADM, OXC 等设备实现，OPS,OBS,OLS 技术是属于光域的分组交换。

9.2.1 光的电路交换技术

OCS 技术类似于现存的电路交换技术，采用 OXC,OADM 等光器件设置光通路，中间节点不需要使用光缓存，目前对 OCS 的研究已经较为成熟，网络需要为每一个连接请求建立从源端到目的地端的光路（每一个链路上均需要分配一个专用波长）。

交换过程共分 3 个阶段：光路建立、光路保持和光路释放。

根据交换对象的不同 OCS 又可以分为以下 4 种类型。

1. 空分光交换

空分光交换技术是根据需要在两个或多个点之间建立物理通道，这个通道可以是光波导也可以是自由空间的波束，信息交换通过改变传输路径来完成。主要的功能元件是空间光开关。

空分光交换利用光开关及光开关阵列/矩阵实现任意两点间光通道连接。如图 9-5 所示，

图 9-5 (a) 是由 4 个 1×2 光开关器件组成的 2×2 光交换模块。 1×2 光开关器件使用 LiNbO_3 方向耦合器型光开关, 这种 2×2 光交换模块是最基本的光交换单元, 它有 2 个输入端和 2 个输出端, 通过电压控制, 可以实现图 9-5 (b) 所示的平行连接和交叉连接。图 9-5 (c) 是由 16 个 1×2 光开关器件或 4 个 2×2 光交换单元组成的 4×4 LiNbO_3 光交换单元。

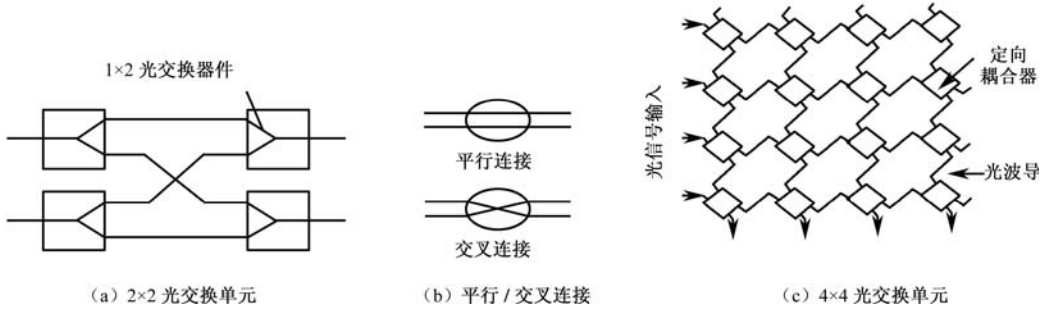


图 9-5 空分光交换

2. 时分光交换

时分复用是通信网中普遍采用的一种复用方式, 时分光交换就是在时间轴上将复用的光信号的时间位置 t_1 转换成另一个时间位置 t_2 。主要的功能元件是光纤延迟线。

目前的时分光交换器都是由空间光开关和一组光纤延迟线构成, 如图 9-6 所示。光纤延迟线以光信号在其中传输一个时隙时间经历的长度为单位, 光信号需要延时几个时隙, 就让它经过几个单位长度的光纤延迟线。1996 年推出了世界上第一台采用光纤延迟线和 4×4 光开关的 32 Mb/s 时分复用光交换系统。

时分光交换实际完成时隙光交换。所谓时隙互换, 就是把时分复用帧中各个时隙的信号互换位置, 如图 9-6 (b) 所示, 首先让时分复用信号经过分接器, 在同一时间内, 分接器每条出线上依次传输某一个时隙的信号, 然后使这些信号分别经过不同的光延迟器件, 获得不同的延迟时间, 最后用复接器把这些信号重新组合起来。图 9-6 (c) 表示时分光交换的空分等效图。

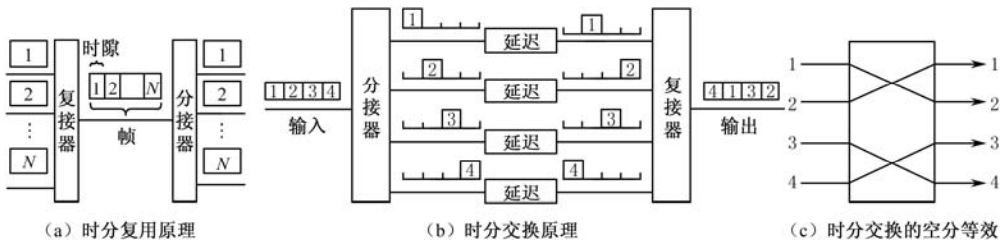


图 9-6 分光交换

3. 波分光交换

波分光交换技术, 是指光信号在网络节点中不经过光/电转换, 直接将所携带的信息从一个波长转移到另一个波长上。目前国际上实验的全光网更侧重于波分光交换的应用。主要的功能元件是 OTU。波分光交换是以波分复用原理为基础的, 有波长互换光交换和波长

选择光交换两种。

波长互换光交换是先用波长解复用器件将波分复用信道在空间分割开各波长，从解复用信号中提取所需波长信号，并把它调制到另一波长上去，这里利用波长转换器（OTU）来完成，然后再把它们复用起来输出，如图 9-7 所示。

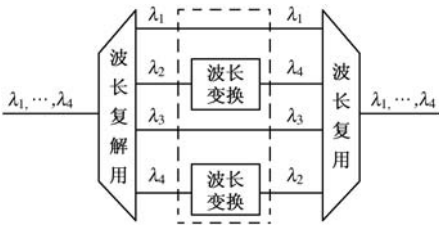


图 9-7 波长互换光交换

波长选择光交换是指直接将所携的信息转移到另一个波长。当然也可以看成是 $N \times N$ 阵列型波长交换系统， N 路原始信号在输入端分别调制 N 个可调谐激光器（TL），产生出 N 个波长的已调信号，经星状耦合器后形成一个波分复用信号。在输出端采用波长可调谐光滤波器（TF）选择所需波长信号，从而实现了这 N 个光波的交换，如图 9-8 所示。

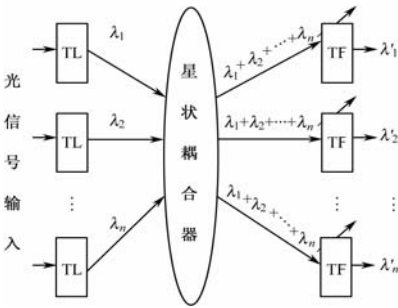


图 9-8 波长选择光交换

4. 码分光交换

码分光交换技术，是将某个正交码上的光信号交换到另一个正交码上，实现不同码字之间的交换。在光码分交换中用到光码分复用（OCDM）技术，它是一种扩频通信技术，不同用户的信号用互相正交的不同码序列填充，接收时只要用与发送方相同的码序列进行接收，即可恢复原用户信息。对于光纤通信的 IM-DD 方式，OCDM 对全光信号的处理也限于对数据“1”的编/解码，而对数据“0”不作任何处理。

图 9-9 给出了 OCDM 交换的一个逻辑框图。

码分光交换与时分光交换相比不需要同步，图中 OCDM 编码主要完成的功能是用不同的正交码来对光比特或光分组进行填充，星状耦合器将信息送到所有的输出端口。

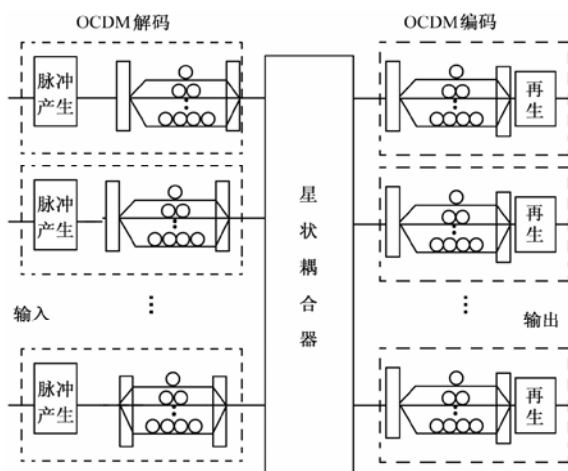


图 9-9 OCDM 交换逻辑框图

9.2.2 光的分组交换技术

1. 光分组交换技术的产生

IP 思想与光网络的结合产生了另一类光交换技术——光分组交换 OPS 技术。光分组交换借鉴电域分组交换的思想，向光层渗透和延伸。OPS 在灵活性和带宽利用率方面表现出独有的优势，而且能够在光层上以非常细小的交换粒度（速率等级）按需共享可用带宽资源，适用于传输 IP 那样突发数据。因此，OPS 是一种前途非常看好的技术。

未来的光网络要求支持多粒度的业务，其中小粒度的业务是运营商的主要业务，业务的多样性使得用户对带宽有不同的需求，OCS 在光子层面的最小交换单元是整条波长通道上数吉比特的流量，很难按照用户的需求灵活地进行带宽的动态分配和资源的统计复用，所以光分组交换应运而生。

2. 光分组交换技术的原理

OPS 直接在光域中完成 IP 分组的封装与复用、传送与交换，对波长通道实施统计复用，资源利用率高。在 OPS 中，业务数据和分组头一起放置在固定长度时隙中，但是传输和存储都采用光的形式。当多个光分组交换节点组成网络时，各节点每个输入端口上的分组到达时间是随机的，交换节点内部对分组进行重新排队，然后对光分组转发。OPS 交换原理，如图 9-10 所示。OPS 交换网络，如图 9-11 所示。

OPS 以光分组作为最小的交换颗粒，数据包的格式为固定长度的光分组头、净荷和保护时间 3 部分。在交换系统的输入接口完成光分组读取和同步功能，同时用光纤分路器将一小部分光功率分出送入控制单元，用于完成如光分组头识别、恢复和净荷定位等功能。光交换矩阵为经过同步的光分组选择路由，并解决输出端口竞争。最后输出接口通过输出同步和再生模块，降低光分组的相位抖动，同时完成光分组头的重写和光分组再生。

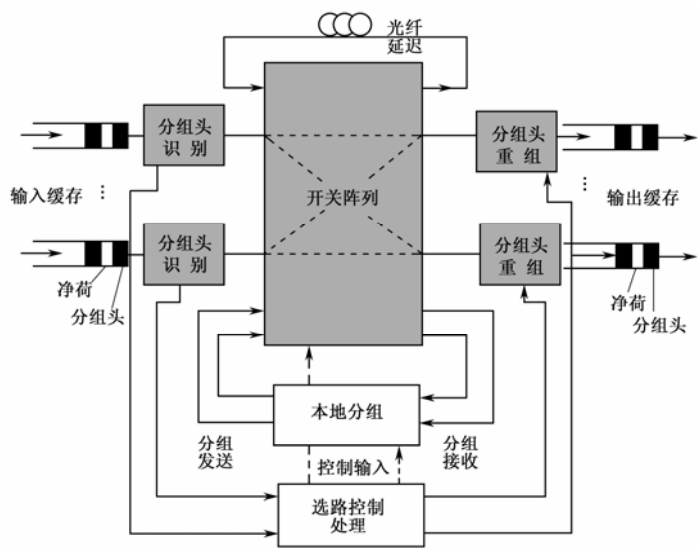


图 9-10 光分组交换原理

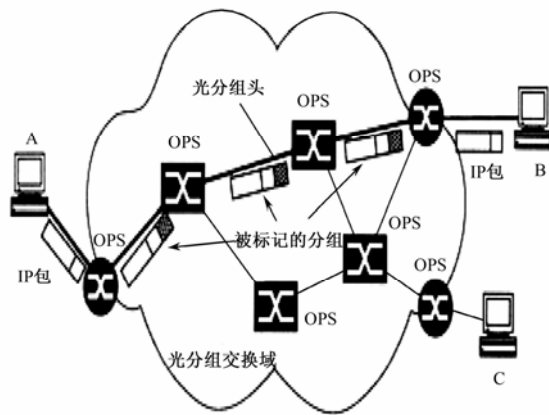


图 9-11 OPS 交换网络示意图

从长远来看，全光的 OPS 是光交换的发展方向。OPS 是一种非面向连接的交换方式，采用单向预约机制，在进行数据传输前不需要建立路由、分配资源。分组净荷紧跟分组头在相同光路中传输，网络节点需要缓存净荷，等待分组目的地的分组头的处理，以确定路由。相比 OCS，OPS 有着很高的资源利用率和很强的适应突发数据的能力。但是也存在着两个近期内难以克服的障碍：一是光缓存器技术还不成熟，二是在 OPS 交换节点处，多个输入分组的精确同步难以实现，因此 OPS 难以在短时间内实现。

9.2.3 光突发交换技术

1. 光突发交换技术的产生

对 OPS 技术的研究主要集中在定长分组的处理上，鉴于目前光信号处理技术尚未足够

成熟, 1997 年出现了一种新的光交换技术——光突发交换 OBS, OBS 作为兼顾电路交换与分组交换优点的折中方案。

OBS 克服了 OPS 的缺点, 对光开关和光缓存的要求降低, 并能够很好地支持突发性的分组业务, 同时与 OCS 相比, 它又大大提高了资源分配的灵活性和资源的利用率, 被认为很有可能在未来互联网中扮演关键角色。

2. 光突发交换技术的原理

“突发”的最初定义就是一串突发性的语音流或数字化的消息。在 OBS 中交换的颗粒为“突发”(Burst), 光突发交换中的“突发”可以看成是由一些较小的, 具有相同出口边缘节点地址和相同 QoS 要求的, 数据分组组成的超长数据分组, 这些数据分组可以来自于传统 IP 网中的 IP 包。在电路交换中, 每次呼叫由多个突发数据串组成, 而在包交换中, 一串突发数据要分在几个数据包中传输。OBS 的交换粒度介于电路交换和分组交换两者之间, 是多个分组的组合。由于 OBS 的交换颗粒较粗, 因而处理开销大为减少。

光突发的分组为可变长度, 突发数据包含两种光分组: 承载路由信息的控制分组和承载业务的数据分组, 两者在时间上和信道上分离传输与处理。

在 OBS 中, 在网络的边缘处抵达的 IP 包将被封装成突发, 然后首先在控制波长上发送(连接建立)控制分组, 而在另一个不同波长上发送数据分组, 如图 9-12 所示, 在 OBS 网络中, 突发数据从源节点到目的节点始终在光域内传输, 而控制信息在每个节点都需要进行光-电-光的变换以及电处理。控制信道与突发数据信道的速率可以相同, 也可以不同。

光突发交换结合了较大粒度的波长(电路)交换和较细粒度的光分组交换两者的优点, 能有效地支持上层协议或高层用户产生的突发业务。在 OBS 中, 首先在控制波长上发送控制(连接建立)分组, 然后在另一个不同的波长上发送突发数据。每一个突发数据分组对应于一个控制分组, 并且控制分组先于数据分组传送。先一步传输的控制分组在中间节点为其对应的突发数据分组预定必要的网络资源, 并在不等待目的节点的确认信息的情况下就立即发送该突发数据分组。

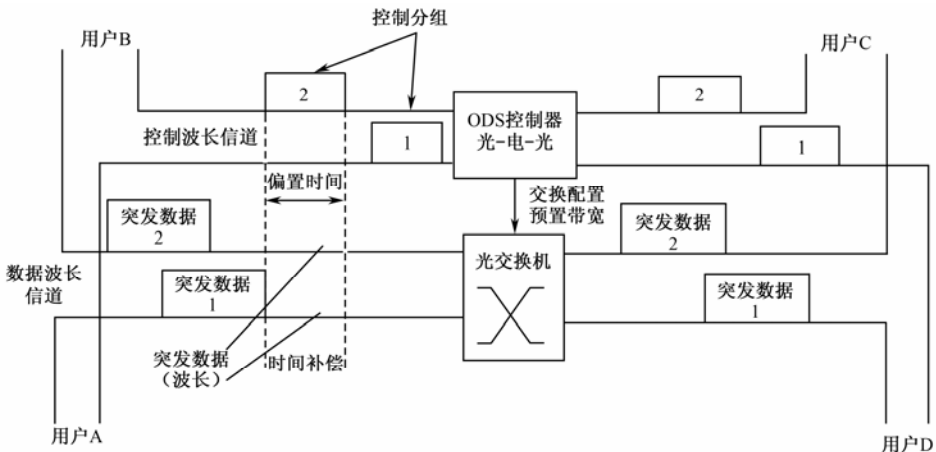


图 9-12 光突发交换原理示意图

数据信道与控制信道的隔离简化了突发数据交换的处理, 而且控制分组长度十分短,

因此可以实现高速处理。OBS，OCS，OPS 之间的特性比较如表 9.1 所示。

表 9.1 OBS,OCS,OPS 之间的特性比较

交换方式	带宽效率	系统延迟	流量自适应性	复杂度
OCS	低	高	低	低
OBS	高	中	高	低
OPS	高	低	高	高

9.2.4 光标记交换技术

OLS 技术，是在光包的包头地址上用各种方法打上标记，这样在光交换节点上根据光标记来实现全光交换。

光标记的产生和提取是光标记交换的核心技术。光标记信号一般是 Mb/s 量级的低速率信号，而光包的传输速率都在 Gb/s 量级上，将低速的标记信号加在高速的光包信号上，可以根据不同的机制采用不同的方法。

OLS 主要应用在 IP 包的全光标记交换。IP 包由源节点发出，经过核心光网络传输和标记交换后，到达目的节点。在核心光网络的接入处，边缘路由器通过添加副载波复用（SCM）标记且对 IP 包重新封装；在核心光网络内部，全光核心路由器通过波长转换和 SCM 标记交换，对新的 IP 包进行选路和传递；当 IP 包离开核心光网络时，边缘路由器移去其 SCM 标记，并进行一次波长转换。IP 包标记交换具有低延迟、低开销的特点，简化了 IP 包的传输，使数据速率可达到 Tb/s 级。另外，IP 包标记交换避免了路由查询，减少了通过 IP 层的包数量，并支持其他协议。

展望光交换技术的未来发展，市场和用户是决定光网络去向何方的重要因素。目前光的电路交换技术已发展得较为成熟，进入实用化阶段。2001 年 9 月我国上海交通大学、上海市科委等联合开发的首家全光通信技术示范网，现已正式投入使用。光分组交换作为更加高速、高效、高度灵活的交换技术，能够支持各种业务数据格式，如计算机通信的数据、语音、图表、视频数据和高保真音频数据等的交换。

光网络已经由过去的点到点 WDM 链路发展到今天面向连接的 OADM/OXC 和自动交换光网络（ASON），再演进到下一代 DWDM 基础上宽带电路交换与分组交换融合的智能光网络，光交换技术发展将会在其中起到决定性的作用。

9.3 自动交换光网络（ASON）

全光网络寄托了人们简化网络结构，增加通信容量，延长通信距离的美好理想。在全光网的操作中，光域上的选路和交换功能是一种线性操作，光层上网络可由一些线性设备来处理，这些设备或是固定配置的或是可控重构的。通常将这些线性光网络称为透明光网络，同时，在网络中还有大量的非线性操作，比较典型的有信号的检测、信号再生、数据缓存和一些逻辑功能（如读写包头等）。

依目前的技术水平，要在全光域上执行上述非线性操作是非常困难的，在全球性/全国

性的大网，网内的波长调度和传输也难以实现，只能组成一个有限区域的子网，在子网内实现透明传输和处理。

考虑到这些因素，ITU-T 倾向于暂时放弃或搁置全光网的概念，转向更为现实的光传输网概念，从半透明开始逐渐向全透明演进，由此产生 ASON。因此目前所说的“光网络”是由高性能的光/电转换设备连接众多的全光透明子网的集合，ASON 不限定网络的透明性，也不排除光/电转换。ASON 中的“自动”主要指在 ASON 网络中高度智能化的控制平面根据网络运行的种种需要，遵循标准化的协议所引起的交叉或交换。

9.3.1 ASON的体系结构及主要功能

ASON 是指在 ASON 信令网控制之下动态完成光传输网内链路的连接/释放、交换、传输等一系列功能的网络。将数据网的智能化引入光网络是下一代光网络的核心思想，在光传输网络中引入控制平面以实现网络资源的实时按需分配，从而实现光网络的智能化。

ITU-T 的 G.8080 和 G.807 定义了一个与具体实现技术无关的 ASON 的体系结构，它包括 3 个独立逻辑功能平面，即传输平面 TP (Transport Plane)、控制平面 CP (Control Plane) 和管理平面 MP (Management Plane)，如图 9-13 所示。

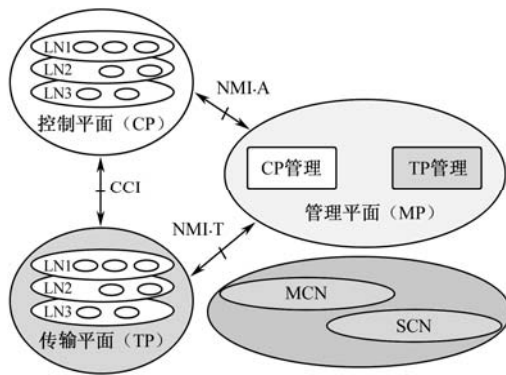


图 9-13 ASON 的三个逻辑功能平面

1. 传输平面

为用户提供从一个端到另一个端双向或单向信息传输，同时，也负责部分网络控制和管理信息的传递。它按 ITU-T G.805 建议进行分层，有两种承载方式，可以通过 ITU-T G.803 规范的 SDH 来承载，也适用于 G.872 定义的光传输网 (OTN)。为了能够实现 ASON 的各项功能，传输平面要具有较强的信号质量检测功能及多粒度交叉连接功能。

2. 控制平面

控制平面是 ASON 的核心，由一组通信实体组成，负责完成呼叫控制和连接控制功能，主要是连接建立释放、监测和维护，并在发生故障时恢复连接，由信令网支撑。

控制平面大体分为 3 个部分：信令、路由和链路资源管理，如图 9-14 所示。信令部分尤为重要，包括网络呼叫控制器、网络呼叫接纳控制器、连接控制器、连接接纳控制器等；

路由部分涉及光通道的选择和路由信息的分发，包括路由控制器等；链路资源管理则是管理网络的拓扑和链路资源，包括链路资源管理器、资源发现控制器等。此外还有网络拓扑和资源数据库、协议控制器、策略控制器等其他组件。

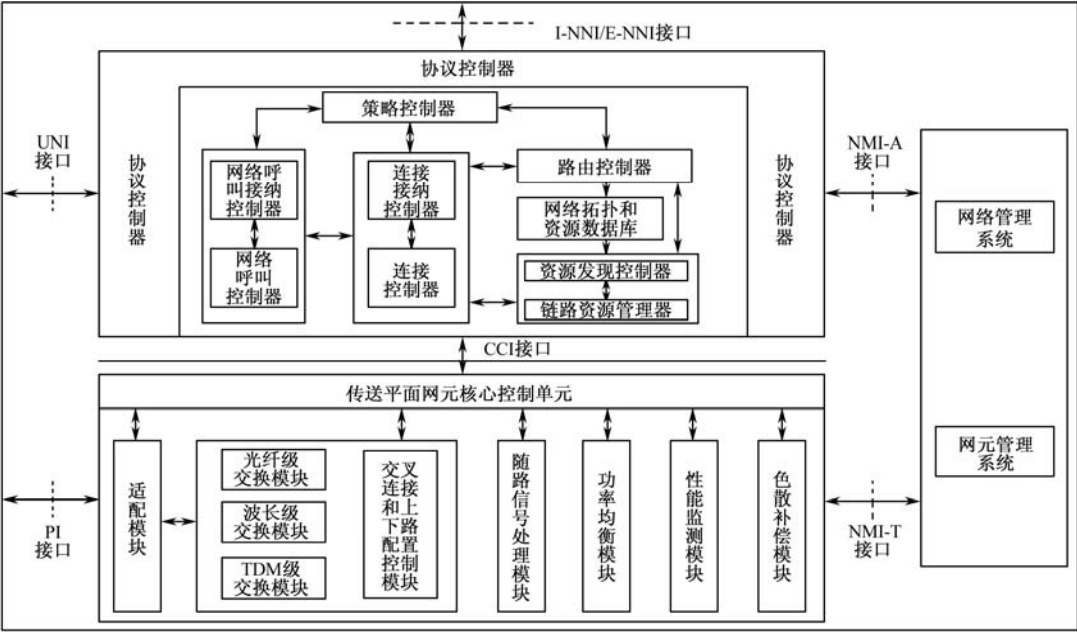


图 9-14 ASON 控制平面的功能组件

连接建立过程如下：

用户的呼叫请求消息由用户网络中的呼叫方控制器发起，通过 UNI 接口，经协议控制器翻译之后送到 ASON 中的呼叫接纳控制器，判别该用户的呼叫请求及其呼叫的参数是否符合双方的原先设定。如果符合则接纳该用户呼叫并转发给网络呼叫控制器，而网络呼叫控制器又将该呼叫请求消息发送给该次呼叫的被呼叫方呼叫控制器，被呼叫方也有其自身的呼叫接纳策略，它可以接纳或拒绝该次呼叫。

一旦被呼叫方接纳该呼叫及其相关的参数，将向 ASON 中的网络呼叫控制器发送接纳该呼叫的确认消息。网络呼叫控制器在得到该接纳确认消息后，向连接控制器发送连接请求消息，连接控制器再调用连接接纳控制器判断现在的网络拓扑和资源能否建立这样一个连接。如果没有适当的空闲资源，将返回阻塞消息；如果有可用的资源则向路由控制器请求该连接的路由信息。路由信息仅包含所要经由的链路信息，而没有特定的 SNP（子网点）链路连接（或波长分配）信息，这些 SNP 链路连接是由本地的链路资源管理器来管理和指配的。连接控制器根据得到的路由信息将向本地的链路资源管理器请求 SNP 链路连接。链路资源管理器返回 SNP 链路连接信息后，连接控制器将通过连接控制接口（CCI），将该 SNP 链路连接配置消息发送给交叉单元控制器，完成本地的交叉连接并向连接控制器返回确认消息，再向该路由上的下一个网元发送连接建立请求消息，直至完成本连接的建立后，将向源节点的连接控制器返回连接建立成功的确认消息。源节点的连接控制器将向用户网络发送连接建立成功的确认消息，用户网络开始通过传输平面传输用户数据。

控制平面的引入是下一代光网络和现有光网络最大的区别。现有的光网络通过网管来

为传输网配置固定的连接，而下一代光网络的智能之处体现在其交换连接的特点，交换连接的发起和维护都是由控制平面完成的。

3. 管理平面

管理平面是完成传输平面、控制平面和整个系统的维护功能，它负责所有平面间的协调和配合，能够进行配置和管理端到端连接，是控制平面的一个补充，包括网元管理系统和网络管理系统，它将继续在集中控制的点击式光通道配置中发挥重要作用。它具有性能管理、故障管理、配置管理、计费管理和安全管理功能，同时还能够实现基本的连接管理并对连接的属性进行配置。此外，它还包含内置式网络规划工具。

9.3.2 ASON的主要特点

ASON 在 ITU-T 的文献中定义为：“通过能够提供自动发现和动态连接建立功能的分布式（或部分分布式）控制平面，在 OTN 或 SDH 网络之上，可实现动态的、基于信令和策略驱动控制的一种网络。”与现有的光传输网技术相比，ASON 最主要的新特点有以下几点。

1. 呼叫和连接过程的分离

ASON 中连接的建立是通过信令的交互自动完成的。在 ITU-T 的建议中把呼叫和连接过程分开来处理，这样可以减少在中间连接控制节点上冗余呼叫控制信息的传输，减少对消息和参数进行解码和翻译的时间。一般呼叫控制可以在网络接入点或网关以及网络边界处进行。这样中间的节点就只需支持连接功能了。

2. 自动资源发现

自动资源发现技术是 ASON 的一大特色，它是指网络能够通过信令协议实现网络资源（包括拓扑资源和服务资源）的自动识别。资源发现过程的自动化对于目前网络中各节点的光纤数量成倍增长的情况相当重要，它可避免手工配置可能发生的错误，并能帮助诊断是否有错误的连接存在。

3. 网络生存技术的新特征

网络生存方面，第一，ASON 是一种网状拓扑结构，提供了可靠的业务生存能力；第二，ASON 的控制平面中使用的多协议标准交换（GMPLS）协议经过拓展，可快速、灵活地实现多种粒度的、多种类型的网络保护/恢复功能；第三，由于控制平面主要是由各种软件功能模块和信令传输网络构成，需要采取相应的策略以保证控制平面的生存性；第四，ASON 中多层网络的保护/恢复也是一个主要内容。

9.3.3 ASON提供的 3 种连接

在 ASON 中存在着 3 种不同类型的连接：永久连接、软永久连接、交换连接。不同类型的连接是为了在不同的应用条件下提供不同类型的连接选择，如图 9-15 所示。

1. 永久连接

永久连接是从管理平面直接配置传输平面资源来建立连接的，这种连接的发起者和配置者都是管理平面，一旦建立连接，在没有管理平面的相应拆除命令情况下连接就一直存在。

2. 交换连接

和永久性连接相反，交换连接的建立是由控制平面的请求来产生的，对传输平面资源的配置也是由控制平面来完成的。这种连接是应用户的请求而建立的，一旦用户撤销请求，那么这条连接就在控制平面的控制下自动拆除。

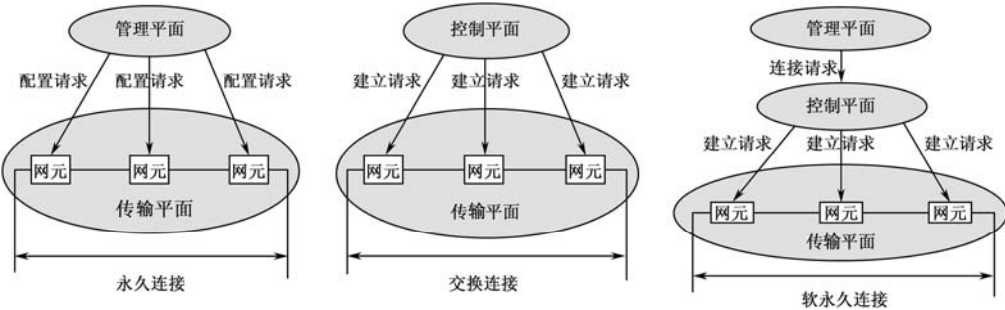


图 9-15 ASON 提供的 3 种连接

交换连接的引入是整个 ASON 的核心所在，可以根据用户的要求自动提供所需的光通道，交换连接的发起和维护都是由控制平面完成的。

3. 软永久连接

软永久连接介于这两种连接之间，这种连接建立的请求也是从管理平面发出的，但对传输网资源的配置却是由控制平面完成的。该连接的拆除也是在管理平面的命令下完成的。

9.3.4 ASON的网络结构模型

根据底层光传输网络与电子交换设备相互关系的不同，ASON 中定义了两种网络模型，分别是层叠模型和对等模型，如图 9-16 所示。

1. 层叠模型

层叠模型也被称作客户—服务者模型。在这个模型中，底层光传输网络作为一个独立的“智能”网络层，起到一个服务者的作用。而电子交换设备被看作是客户。光网络层和客户层被明确地区分开来，它们相互独立，分别选用不同的路由、信令方案及地址空间。客户层和光网络层之间只能通过 UNI 交换非常有限的控制信息。光网络内部的拓扑状态信息对客户层是不可见的。对于更高层的网络服务来说，底层光传输网络就好比一个有着若干接口（UNI 接口）的黑箱子。通过这些接口，多种业务接入设备（如 IP 路由器、ATM 交换设备和 SDH 数字交叉设备等）可以动态向光网络申请带宽资源。

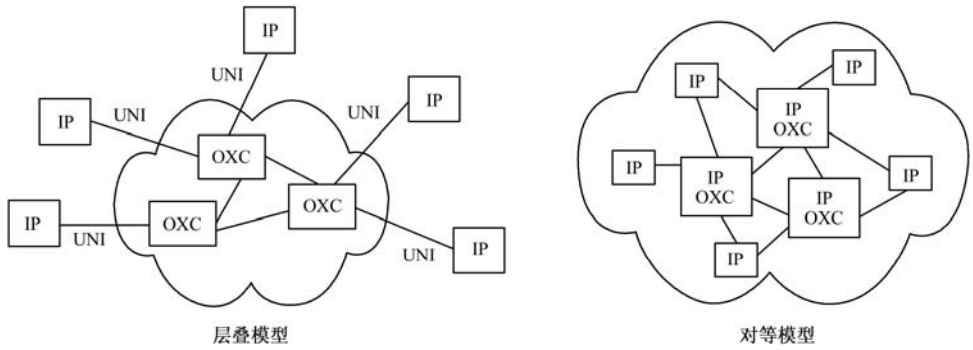


图 9-16 层叠模型和对等模型

从本质上说,目前很多对客户—服务者模型所做的工作就是要确定一个在光网络层和客户层之间的接口协议,为多种业务接入设备提供数据传输服务。

客户—服务者模型的建立要求 UNI 与 NNI 分开。其典型的光通道带宽通常可以提供 2.5Gb/s 以上的传输容量,这个带宽足够在 WDM 上进行 IP 数据传输。客户—服务者模型的主要优势在于它可以很容易地投入到商用,使网络运营商可以拥有自己的 UNI 和 NNI,参与市场竞争。

2. 对等模型

在对等模型中,IP, ATM, SDH 等电层设备和光层设备的地位是平等的,控制平面也是一个统一体,电层设备和光层设备之间不存在明显的界限。产生这个想法的原因是希望将现有在 Internet 网络中使用的成熟的电层控制平面技术扩展到光层控制平面中。同时这个扩展需体现光层控制平面的特有特性。因此层叠模型中的 UNI 接口在对等模型中没有存在的必要。

对于对等模型来说,实现它最大的困难就是光网络服务和 IP 服务不同,它需要支持诸如“线路出租”之类的服务。因此它较其他网络模型来说需要更长的标准制定期。除此之外,在对等模型中,每个电层设备都需要维护一个巨大的链路状态数据库。而在层叠模型中光层的拓扑信息对电层设备来说是没有任何意义的。

9.3.5 ASON的标准化

自 1998 年智能光网络的概念被提出,到 2000 年 ITU-T 正式确定开展 ASON 的标准化工作,ASON 的相关技术研究和标准工作取得了很大进展。涉及 ASON 标准化工作的主要国际标准组织包括 ITU-T、互联网工程任务组以及 OIF。

1. 国际电信联盟标准

ITU-T 提出了 ASON 的体系结构和总体要求,以及信令、路由、自动发现等系列建议,其中有关体系结构、信令协议、路由结构等方面的标准已经通过。

在后来的工作中,ITU-T 又将 ASON 的概念进行了推广,使之适用于不同的传输网技术,从而制定了新的草案 G.8080 (智能传输网络)。这种网络为在全网中建立和释放连接通

道提供了一系列控制机制。现在 ITU-T 已经形成一系列框架标准，包括 G.871, G.872, G.874, G.875, G.709, G.798, G.959, G.7719 等。

2. Internet工程任务组

IETF 提出了面向光网络控制的通用多协议标记交换（GMPLS）体系架构，包含信令、路由、链路管理等规范，其中有关信令方面的 3 个 GMPLS 标准草案已经成为了正式的 RFC。GMPLS 对 MPLS 进行了扩充，引入了时分复用机制、波长变换机制和空间交换机制。

3. 光互联论坛

OIF 不是一个正式的标准化组织。OIF 在 UNI1.0 的成功基础上，进一步开发了 UNI2.0 草案，根据运营商需求增加了很多新的功能，包括支持呼叫、双归、修改带宽以太网业务和扩展的安全性等。2004 年 1 月，ENNI1.0 信令规范得到正式表决通过。OIF 的初衷是要定义 UNI 和通过这个接口提供的网络服务，尤其是实现在光层面的 IP 数据传输。虽然这个组织最终需要建立一个开放的网络结构以适应更广泛的客户群（例如 IP 路由器、SDH、千兆位以太网、帧中继等），但它们还是决定要将目前的首要任务定位在将 IP 路由器作为光网络的客户上。

9.3.6 ASON的应用

AT&T 公司率先在全美范围内敷设了连接约 100 个城市的智能光网络；沃达丰，西班牙电信，Network 等运营商也相继将 ASON 应用在干线网络中。近年来，我国的主要电信运营企业对 ASON 技术投入了极大的关注。2003 年，中国铁通在吉林完成了省内智能光网络试验，北京通信首次在国内城域网上采用了智能光网络技术，中国电信、中国联通等也积极开展相关技术研究和经济性分析，并着手 ASON 试验网的规划和建设。

ASON 建设的第一步是构建网状网。网状网提供的保护和恢复相结合的能力能保证在网络中发生多点故障的恶劣情况下不中断业务，从而提高了网络生存性。

从国内运营商的需求来看，可以在主干传输网或城域传输网中首先引入 ASON。主干传输网具有向网状网演进的迫切需求，主干网对网络资源优化的要求高，需要丰富的保护恢复机制。因此，在长途节点可以首先使用基于 O/E/O 交换技术的大容量交叉连接设备，并引入 ASON 的信令、路由协议和 NNI 接口，实现 ASON 的功能。但是，在骨干网引入 ASON，对业务和网络整体结构的影响较大，运营商对此比较慎重。城域传输网的业务量大，具有对动态业务调度要求高的特点，而且在城域网中引入 ASON 对全网的影响较小，因此国内一些运营商考虑首先在城域传输网的核心层面引入 ASON。

由于目前 ASON 接口标准还不成熟，不同厂家之间难以实现互连互通，因此现有的 ASON 设备还不能构成标准的 ASON 网络，一般称之为智能光网络。现阶段部署的智能光网络必然选用单一厂家的设备，在这种组网方式下，ASON 节点之间采用 I-NNI 接口互连，对外采用标准 UNI 接口连接客户网络。由于 I-NNI 接口属于网络内部接口，不涉及互连互通，因此允许厂家选择自己的控制协议，可以不要求协议和信令机制的标准化。

Siemens 公司 ASON 实验网结构举例如图 9-17 所示。

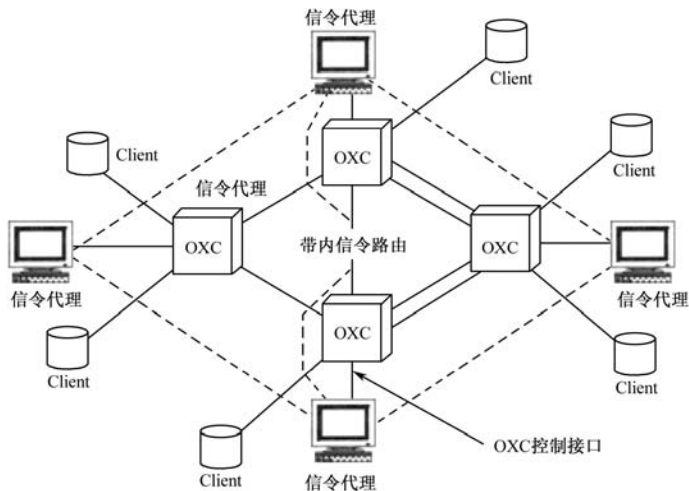


图 9-17 Siemens 公司 ASON 实验网结构

2001 年中国完成的“863”项目中，由多家公司和高校承担了 OADM 及 OXC 的研制，并用样机组成了如图 9-18 所示的试验网，该网络及设备的成功试验，为我国在 OXC 和 OADM 等智能产品的开发打下了基础。

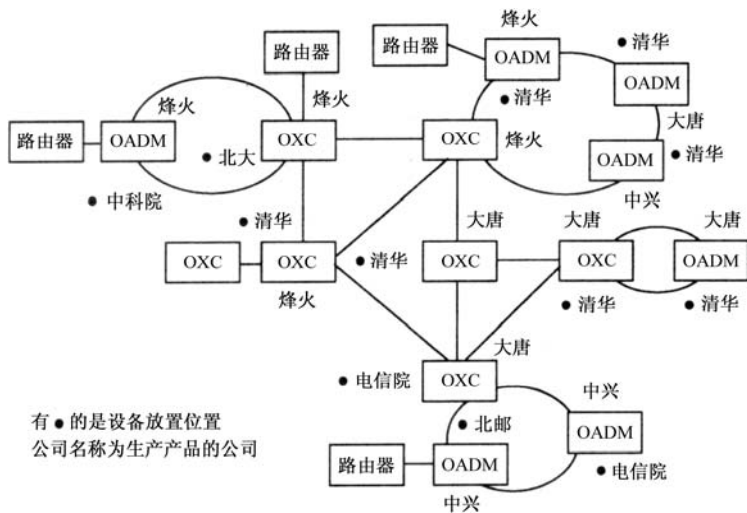


图 9-18 中国信息光网络试验网的组成

随着新一代光网络技术的日趋成熟，ASON 标准化的逐步完善，ASON 将 IP 传输网的智能性和 WDM 光网络的宽带宽有机的结合在了一起。一方面利用 WDM 的带宽，ASON 可以提供巨大的传输容量，同时单位比特信息的传输成本大大降低，另一方面利用 IP 传输网的智能性，ASON 可以很好地和目前的电层面设备无缝连接。因此 ASON 是全光通信网实现成功的一个台阶。

习 题

1. 简述全光通信网的基本概念及特点。
2. 组成全光通信网的基本硬件设备有哪些？
3. 简述目前全光通信网中交换技术的主要种类及工作原理。
4. 简述自动交换光网络与全光网在网络结构上的区别。
5. 简述 OXC 和 DXC 在功能上的区别。
6. 光的电路交换网络和光的分组交换网络各有什么特点？
7. 光突发交换的“突发”指的是什么？光突发交换的控制分组和数据分组在网络中是如何传输和处理的？
8. ASON 有什么样的体系结构，在光传输网络中引入控制平面的目的是什么？

参 考 文 献

- [1] Michael bass 著. 胡先志等译. 光纤通信——通信用光纤、器件和系统. 北京: 人民邮电出版社, 2004.7.
- [2] Walter Goralski 著. 胡先志等译. 光网络与波分复用. 北京: 人民邮电出版社, 2003.1.
- [3] 王秉钧等. 光纤通信系统. 北京: 电子工业出版社, 2004.11.
- [4] 李玲等. 光纤通信基础. 北京: 国防工业出版社, 2001.7.
- [5] 李履信等. 光纤通信系统. 北京: 机械工业出版社, 2003.7.
- [6] 张中荃等. 接入网技术. 北京: 人民邮电出版社, 2006.5.
- [7] 张宝富等. 光纤通信. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.2.
- [8] 张宝富等. 现代光纤通信与网络教程. 北京: 人民邮电出版社, 2002.7.
- [9] 张宝富等. 全光网络. 北京: 人民邮电出版社, 2002.1.
- [10] 顾畹仪等. 光纤通信系统(修订版). 北京: 北京邮电大学出版社, 2006.9.
- [11] 张劲松等. 光波分复用技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.6.
- [12] 胡庆等. 通信光缆与电缆工程. 北京: 人民邮电出版社, 2005.2.
- [13] 胡庆等. 电信传输原理. 北京: 电子工业出版社, 2004.8.
- [14] 丁么明等. 光波导与光纤通信基础. 北京: 高等教育出版社, 2005.5.
- [15] 王庆等. 光纤接入网规划设计手册. 北京: 人民邮电出版社, 2009.8.
- [16] 李鉴增等. 光纤传输与网络技术. 北京: 中国广播电视出版社, 2009.1.
- [17] 纪越峰. 综合业务接入技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 1999.11.
- [18] 马军山等. 光纤通信原理与技术. 北京: 人民邮电出版社, 2004.8.
- [19] 苏翼凯等. 高速光纤传输系统. 上海: 上海交通大学出版社, 2009.2.
- [20] 阎德升等. EPON 新一代宽带光接入技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 2008.5.
- [21] 沈金龙等. 计算机通信网. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.8.
- [22] 谢希仁编著. 计算机通信网(第4版). 北京: 电子工业出版社, 2005.8.
- [23] 吴健学等. 自动交换光网络. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003.12.
- [24] 邱昆等. 光纤通信系统. 成都: 电子科技大学出版社, 2005.12.
- [25] 龚倩等. 智能光交换网络. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003.6.
- [26] 张杰等. 自动交换光网络 ASON. 北京: 人民邮电出版社, 2004.2.
- [27] 巴继东等. IP 与光互联网. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.4.